

**UQAR**

Université du Québec  
à Rimouski

**MODÉLISATION ET OPTIMISATION DE LA TECHNIQUE  
D'OSCILLATION DE FAISCEAU POUR LE SOUDAGE AU LASER  
DES ALLIAGES D'ACIER DOUX A36, INOXYDABLE 304L ET  
GALVANISÉ A653**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M.Sc.A.)

PAR

© SAID OUAMER

[Mars 2023]

**Composition du jury :**

- **Véronique Dassylva-Raymond, présidente du jury, Université du Québec à Rimouski**
- **Noureddine Barka, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski**
- **Mohamed Khalifa, Ingénieur en conception à Carbolite Gero**

Dépôt initial le [17 décembre 2022]

Dépôt final le [21 mars 2023]

# UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

Service de la bibliothèque

## Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou un mémoire ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

À ma famille

## REMERCIEMENTS

Alors que je termine ce projet, je suis submergé par des sentiments de gratitude envers tous ceux qui m'ont apporté leur aide tout au long du chemin.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma gratitude envers Monsieur Noureddine Barka, mon directeur de recherche, pour ses conseils tout au long de mon projet et sa disponibilité constante.

Je souhaite également remercier toute l'équipe du Département de mathématique, informatique et génie pour son dévouement envers la réussite des étudiants. Cela inclut non seulement les professeurs et les conférenciers qui transmettent leur savoir, mais aussi les assistants et les techniciens : Suzie Loubert, Karel Uhlir, Vianney Leroueil, Richard Lafrance, Jean-Charles Morin, et Denis Labbé, qui sont là pour aider les étudiants, je tiens également à exprimer ma gratitude envers Farah Fiset et Jacqueline Thériault de l'administration.

Je suis reconnaissant envers ma famille pour son soutien inconditionnel depuis mes premiers pas à l'université jusqu'à l'obtention de ma maîtrise. Je remercie mes parents, qui ont fait tant de sacrifices pour moi tout au long de leur vie, surtout lorsqu'il s'agissait de poursuivre mes rêves.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement notre équipe de recherche pour son amitié précieuse et son soutien constant tout au long de ce projet.

## RÉSUMÉ

Le soudage au laser a gagné en popularité et est devenu de plus en plus important pour le soudage de diverses structures en acier. Les progrès récents de la technologie laser ont conduit à la mise au point d'une nouvelle génération de lasers haute puissance capables de souder des sections plus épaisses, alors qu'ils étaient auparavant limités aux feuilles minces. L'objectif de ce projet est d'examiner les effets des paramètres de soudage au laser sur trois types d'acier différents, à savoir l'acier doux A36, l'acier inoxydable 304L et l'acier galvanisé A653, pendant le soudage par faisceau laser. L'étude a consisté à souder des tôles de 1,8 mm d'épaisseur de chaque type d'acier en utilisant trois motifs de faisceau laser oscillant - sinusoïdal, triangulaire et carré - avec deux facteurs de soudage variables, à savoir la puissance de faisceau laser et la vitesse de soudage, et deux facteurs constants, à savoir l'amplitude de l'oscillation et la fréquence de soudage. Pour étudier les effets des paramètres de soudage et des motifs du faisceau laser oscillant sur la performance des soudures, la méthode du plan d'expériences de Taguchi a été utilisée, définissant un plan d'expériences L9. Les propriétés de la microstructure, de la microdureté et de la résistance ultime à la traction ont été mesurées et analysées pour les spécimens soudés en utilisant la méthode ANOVA. Il y a également eu une discussion sur les différences et les similitudes entre les motifs des faisceaux laser produits par les faisceaux oscillants sur les trois différents types d'acier. L'optimisation a été réalisée en utilisant la méthode de désirabilité pour trouver les valeurs optimales de soudage. L'étude a révélé que le motif sinusoïdal a donné de meilleures performances mécaniques que les motifs triangulaires et carrés pour l'acier galvanisé A653. Pour l'acier inoxydable 304L, les facteurs les plus significatifs étaient la puissance du laser et la vitesse de soudage, tandis que l'oscillation du faisceau avait des effets minimes. Le motif carré était le meilleur faisceau laser oscillant pour le soudage de deux plaques de ce type d'acier. Pour l'acier doux A36, l'utilisation d'un faisceau laser oscillant à travers le motif triangulaire avec une puissance moindre a permis d'obtenir une force de soudage plus élevée.

**Mots clés :** soudage au laser, acier doux A36, acier galvanisé A653, acier inoxydable 304L, oscillation de faisceau, puissance du laser, vitesse de soudage, résistance ultime à la traction , ANOVA.

## ABSTRACT

Laser welding has gained popularity and has become increasingly important in welding various steel structures. Recent advancements in laser technology have led to the development of a new generation of high-powered lasers that can weld thicker sections, which were previously limited to thin sheets. The aim of this project is to examine the effects of laser welding parameters on three different types of steel, namely A36 mild steel, 304L stainless steel, and A653 galvanized steel, during laser beam welding. The study involved welding 1.8 mm thick sheets of each type of steel using three oscillating laser beam patterns - sinusoidal, triangular, and square - with two variable welding factors: laser beam power and welding speed, and two constant factors: oscillation amplitude and welding frequency. To investigate the effects of welding parameters and oscillating laser beam patterns on weld performance, the Taguchi design of experiments method was used, defining an L9 design of experiments. The properties of microstructure, microhardness, and ultimate tensile strength were measured and analyzed for the welded specimens using the ANOVA method. The study also included a discussion of the differences and similarities between the laser beam patterns produced by oscillating beams on the three different types of steel. The optimization was performed using the desirability method to find the optimal welding values. The study revealed that the sinusoidal pattern gave better mechanical performance than the triangular and square patterns for galvanized A653 steel. For 304L stainless steel, the most significant factors were laser power and welding speed, while beam oscillation had minimal effects, and the square pattern was the best oscillating laser beam for welding two plates of this type of steel. For ASTM A36 mild steel, using a laser beam oscillating through the triangular pattern with less power resulted in higher welding strength.

**Key words:** laser welding, mild steel A36, galvanized steel A653, stainless steel 304L, beam oscillation, laser power, welding speed, ultimate tensile strength, ANOVA.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	v
RÉSUMÉ.....	vi
ABSTRACT .....	vii
TABLE DES MATIÈRES .....	viii
LISTE DES TABLEAUX .....	xii
LISTE DES FIGURES.....	xiii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES .....	xvi
LISTE DES SYMBOLES .....	xvii
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
0.1     CONTEXT ET GÉNÉRALITÉS.....	1
0.2     LE SOUDAGE AU LASER.....	3
0.2.1    Le principe de fonctionnement du laser .....	4
0.2.2    Mécanisme du soudage laser .....	9
0.2.3    Paramètre du soudage laser .....	11
0.3     Faisceau laser oscillant .....	13
0.3.1    Système de scanner ILV DC .....	13
0.4     PROBLEMATIQUE .....	15
0.5     OBJECTIFS.....	18
0.6     MÉTHODOLOGIE .....	19
0.7     DIVISION .....	20
<b>CHAPITRE 1 : Optimisation du soudage au laser de l'acier doux ASTM A36 avec différents modèles d'oscillation du faisceau laser en utilisant des données expérimentales et de simulation.....</b>	<b>24</b>
1.1     RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE .....	24



1.2	TITRE DU PREMIER ARTICLE .....	25
1.3	ABSTRACT .....	25
1.4	NOMENCLATURE .....	25
1.5	INTRODUCTION .....	26
1.6	EXPERIMENTAL PROCEDURES.....	28
1.6.1	Properties of ASTM A36 steel .....	28
1.6.2	The laser welding system .....	29
1.6.3	Sample preparation.....	31
1.6.4	Micro-hardness analysis .....	32
1.6.5	Tensile test.....	33
1.7	RESULTATS AND DISCUSSION .....	34
1.7.1	Hardness profile analysis .....	34
1.7.2	Analysis of tensile properties .....	35
1.7.3	ANOVA analysis and development of the response surface (RS) regression model.....	37
1.7.3.1	Analysis of variance .....	37
1.7.3.2	Variation of the developed model .....	39
1.7.4	Effect and optimization of process parameters on tensile strength (UTS).....	41
1.7.4.1	Interaction effects and surface plots .....	41
1.7.4.2	Optimization and confirmation of process parameters.....	45
1.8	CONCLUSION .....	46
1.9	REFERENCE .....	46
	<b>CHAPITRE 2 : Optimisation de la résistance mécanique des soudures oscillées par faisceau laser d'un alliage d'acier galvanisé A653 à l'aide de données expérimentales et de la méthodologie de la surface de réponse .....</b>	<b>48</b>
2.1	RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE .....	48

2.2	TITRE DU DEUXIÈME ARTICLE .....	49
2.3	ABSTRACT .....	49
2.4	NOMENCLATURE .....	49
2.5	INTRODUCTION .....	50
2.6	MATERIALS AND METHODS .....	52
2.6.1	Materials.....	52
2.6.1.1	Properties of ASTM A653 galvanized steel .....	52
2.6.1.2	The laser welding system .....	53
2.6.1.3	Tensile test.....	55
2.6.1.4	Micro-hardness measurement.....	55
2.6.2	Methods.....	56
2.6.2.1	The response surface method .....	56
2.6.2.2	Statistical analysis of data.....	56
2.7	RESULTATS AND DISCUSSION .....	57
2.7.1	Microhardness analysis .....	57
2.7.2	Measured experimental values of the ultimate tensile strength .....	59
2.7.3	Development and selection of the response model .....	62
2.7.3.1	Modeling of the UTS response.....	62
2.7.3.2	Variation of the developed model .....	65
2.7.4	Interaction effects and optimization of process variables .....	66
2.7.4.1	Response surface method .....	66
2.7.4.2	Process parameters optimization .....	70
2.8	CONCLUSION .....	71
2.9	REFERENCE .....	71
	<b>CHAPITRE 3 : Effet des modèles d'oscillation du faisceau sur le soudage laser de l'acier inoxydable 304L : Une étude expérimentale et de modélisation .....</b>	<b>74</b>

3.1	RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE .....	74
3.2	TITRE DU TROISIÈME ARTICLE .....	75
3.3	ABSTRACT .....	75
3.4	NOMENCLATURE .....	76
3.5	INTRODUCTION .....	76
3.6	EXPERIMENTAL PROCEDURE.....	78
3.6.1	Materials.....	78
3.6.2	Laser beam welding .....	79
3.6.3	Characterization methods .....	80
3.6.4	Analysis of the regression model (ANOVA) .....	80
3.7	RESULTS AND DISCUSSION.....	81
3.7.1	Micro-hardness.....	81
3.7.2	Tensile tests .....	82
3.7.3	Statistical models and analysis .....	85
3.7.3.1	Analysis of variance (ANOVA) .....	85
3.7.3.2	Variation of the developed model .....	87
3.7.4	Effects of the process parameters on UTS response .....	89
3.7.5	UTS optimization using desirability function analysis .....	92
3.8	CONCLUSION .....	93
3.9	REFERENCES .....	93
	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>96</b>
	<b>RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS.....</b>	<b>96</b>
	<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>100</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Table 1.1</b> Chemical composition of ASTM A36 mild steel .....	28
<b>Table 1.2</b> Mechanical properties of ASTM A36 mild steel .....	29
<b>Table 1.3</b> Process parameter levels.....	30
<b>Table 1.4</b> Parameters used for the Taguchi method .....	31
<b>Table 1.5</b> Taguchi orthogonal L9 Design of experiment with tensile test results for ASTM A36 mild steel .....	37
<b>Table 1.6</b> ANOVA table for ultimate tensile strength for ASTM A36 mild steel .....	38
<b>Table 1.7</b> Variation of test results for ASTM A36 mild steel .....	40
<b>Table 2.1</b> Chemical composition of galvanized steel as measured by EDS of of A653 galvanized steel .....	53
<b>Table 2.2</b> Mechanical properties of of A653 galvanized steel .....	53
<b>Table 2.3</b> UTS values for all the welding conditions of A653 galvanized steel .....	60
<b>Table 2.4</b> Tensile strength model using ANOVA analysis of A653 galvanized steel.....	63
<b>Table 2.5</b> Coefficient of the tensile strength model of A653 galvanized steel.....	63
<b>Table 2.6</b> Variation of test results for A653 galvanized steel .....	65
<b>Table 3.1</b> chemical composition is measured by EDS of ASIS 304L.....	78
<b>Table 3.2</b> Mechanical properties of ASIS 304L .....	78
<b>Table 3.3</b> UTS values of the welded samples of ASIS 304L .....	84
<b>Table 3.4</b> ANOVA result for the interaction model of ASIS 304L.....	86
<b>Table 3.5</b> Coefficient of the bidirectional interaction model of ASIS 304L .....	86
<b>Table 3.6</b> Confirmation experiments of ASIS 304L.....	88

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 0.1</b> Principe d'absorption .....	5
<b>Figure 0.2</b> Émission stimulée .....	5
<b>Figure 0.3</b> Émission spontanée.....	6
<b>Figure 0.4</b> Type de laser .....	7
<b>Figure 0.5</b> Laser CO2 SLAB[24] .....	8
<b>Figure 0.6</b> Représentation schématique du soudage laser en trou de serrure.....	9
<b>Figure 0.7</b> Représentation des deux modes de soudage laser.....	10
<b>Figure 0.8</b> Schéma des modes et les paramètres de faisceau laser.....	11
<b>Figure 0.9</b> Effet de la position du point focal sur la forme de la soudure .....	13
<b>Figure 0.10</b> Schéma d'un scanner pour la formation dynamique de faisceaux en combinaison avec des lasers CO2.....	14
<b>Figure 0.11</b> Schéma d'un scanner pour la formation dynamique de faisceaux en combinaison avec des lasers de haute puissance couplés à des fibres.....	14
<b>Figure 1.1</b> (a) Fanuc®M-710iC robot and HIGHYAG BIMO laser head (b) YLS-3000 laser source (c) ILV DC-scan .....	30
<b>Figure 1.2</b> The following figure shows: (a) the two ASTM A36 steel plates after welding. (b) the two plates after machining. (c) the plates after cutting (d) the plates after coating and polishing.....	32
<b>Figure 1.3</b> The above figure shows (a) The line of hardness measurements (b) The Vickers microhardness tester (ST-2000) .....	33
<b>Figure 1.4</b> Tensile test setup used for the experiments: (a) MTS 810 tensile machine. (b) specimen location during tensile testing .....	34
<b>Figure 1.5</b> The micro-hardness distributions for all the welded samples with different parameters for ASTM A36 mild steel: (a) Cross-section view of the welded joints indication of various zones (b) Square pattern (c) Triangular pattern (d) Sinusoidal pattern.....	35
<b>Figure 1.6</b> A top view of two fractured samples from the butt joint tensile tests for ASTM A36 mild steel .....	36
<b>Figure 1.7</b> Tensile test results Strain-strain curve of ASTM A36 mild steel .....	37
<b>Figure 1.8</b> Residual plots for UTS Response of ASTM A36 mild steel (a) Normal probability plot (b) normal probability residual as a function of the fitted value.....	39

<b>Figure 1.9</b> Validation of the model fit for ASTM A36 mild steel.....	40
<b>Figure 1.10</b> Sinusoidal pattern (a) Contours plots (b) Response surface diagram showing the effect of laser power and welding speed on the sinusoidal pattern weldment’s tensile behavior ASTM A36 mild steel. ....	42
<b>Figure 1.11</b> Triangular pattern (a) Contours plots (b) Response surface diagram showing the effect of laser power and welding speed on the triangular pattern weldment’s tensile behavior ASTM A36 mild steel. ....	42
<b>Figure 1.12</b> Square pattern (a) Contours plots (b) Response surface diagram showing the effect of laser power and welding speed on the square pattern weldment’s tensile behavior for ASTM A36 mild steel. ....	43
<b>Figure 1.13</b> Main effect curve of process parameters on tensile strength ASTM A36 mild steel.....	44
<b>Figure 1.14</b> Interaction graph of the input process parameters ASTM A36 mild steel .....	44
<b>Figure 1.15</b> UTS response optimization diagram ASTM A36 mild steel .....	45
<b>Figure 2.1</b> Schematic diagram of three modes used for laser welding (a) Sinusoidal pattern (b) Triangular pattern and (c) Square pattern.....	54
<b>Figure 2.2</b> Laser welding configuration used for the experiments on A653 galvanized steel	55
<b>Figure 2.3</b> The hardness distributions for all the welded samples with different parameters: (a) Cross-section view of the welded joints indication of various zones (b) Square pattern (c) Triangular pattern (d) Sinusoidal pattern for A653 galvanized steel .....	58
<b>Figure 2.4</b> Representative top view of the broken specimen from the butt joint tensile tests welded at 1800 W and welding speed of 30 mm/s with a triangular weld pattern for A653 galvanized steel. ....	59
<b>Figure 2.5</b> Stress-strain curves for all the weldments for A653 galvanized steel .....	60
<b>Figure 2.6</b> Histogram of the comparison between the three types of laser beam oscillation weldments for A653 galvanized steel .....	61
<b>Figure 2.7</b> Representative SEM images of the fractured surface of a tensile specimen for A653 galvanized steel welded by a sinusoidal pattern.....	62
<b>Figure 2.8</b> Residual plots for UTS Response of A653 galvanized steel mild steel (a) Normal probability plot (b) normal probability residual as a function of the fitted value .....	65
<b>Figure 2.9</b> Comparison of the measured values with the fitted values for the model of A653 galvanized steel .....	66

<b>Figure 2.10</b> Sinusoidal pattern (a) Contours plots (b) The effect of laser power and welding speed on the sinusoidal pattern weldment's tensile behavior shown using the response surface diagram for A653 galvanized steel.....	67
<b>Figure 2.11</b> Square pattern (a) Contours plots (b) The effect of laser power and welding speed on the square pattern weldment's tensile behavior shown using the response surface diagram for A653 galvanized steel.....	68
<b>Figure 2.12</b> Triangular pattern (a) Contours plots (b) The effect of laser power and welding speed on the triangular pattern weldment's tensile behavior shown using the response surface diagram for A653 galvanized steel.....	69
<b>Figure 2.13</b> Graph of the main effects of the UTS response for A653 galvanized steel.....	70
<b>Figure 2.14</b> UTS response optimization diagram for A653 galvanized steel .....	71
<b>Figure 3.1</b> (a) Fanuc®M-710iC robot and HIGHYAG BIMO laser head (b) YLS-3000 laser source .....	79
<b>Figure 3.2</b> Top view of ASIS 304L sheets welded in a butt joint configuration.....	80
<b>Figure 3.3</b> The hardness distributions for all the welded samples with different parameters : (a) Square pattern (b) Triangular pattern and (c) Sinusoidal pattern for ASIS 304L.....	82
<b>Figure 3.4</b> Top view of the fractured sample after the tensile test for ASIS 304L .....	83
<b>Figure 3.5</b> Stress-strain curves for all the specimens for ASIS 304L .....	83
<b>Figure 3.6</b> SEM images of the fractured surface of a tensile sample for ASIS 304L .....	85
<b>Figure 3.7</b> Residuals plots for each model for ASIS 304L .....	87
<b>Figure 3.8</b> Comparison of measured values with fitted values for the model for ASIS 304L .....	88
<b>Figure 3.9</b> Graph depicting the main effects on the UTS response for ASIS 304L.....	89
<b>Figure 3.10</b> Surface diagrams of UTS (a) sinusoidal trajectory (b) triangular trajectory and (c) square trajectory for ASIS 304L .....	90
<b>Figure 3.11</b> Contour plots of UTS during welding of the three oscillation patterns (sinusoidal, triangular, and square) for ASIS 304L .....	91
<b>Figure 3.12</b> UTS response optimization diagram for ASIS 304L.....	92

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES**

<b>ANOVA</b>	Analyse de la variance
<b>ASTM</b>	Société américaine pour les essais et les matériaux
<b>BM</b>	Métal de base
<b>DMIG</b>	Département mathématiques, informatique et génie
<b>DDL</b>	Degrés de liberté
<b>EDS</b>	Spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie
<b>FZ</b>	Zone de fusion
<b>HAZ</b>	Zone affectée thermiquement
<b>MIG</b>	Gaz inerte métallique
<b>MS</b>	Carré moyen
<b>SEM</b>	Microscopie électronique à balayage S
<b>S</b>	Somme des carrés
<b>UQAR</b>	Université du Québec à Rimouski
<b>UTS</b>	Résistance ultime à la traction



## LISTE DES SYMBOLES

<b>A</b>	Amplitude
<b>AA</b>	Alliage d'aluminium
<b>Adj MS</b>	Moyenne quadratique ajustée
<b>Adj SS</b>	Somme des carrés ajustée
<b>C</b>	Carbone
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de carbone
<b>Cu</b>	Cuivre
<b>F</b>	Fréquence
<b>Fe</b>	Fer
<b><i>h</i></b>	Constante de Planck
<b>HV</b>	Dureté en Vickers
<b>Mg</b>	Magnésium
<b>P</b>	Phosphore
<b>R-sq (adj)</b>	Coefficient de détermination ajustée
<b>R-sq (pred)</b>	Coefficient de détermination prédictive
<b>R-sq</b>	Coefficient de détermination prédictive
<b>S</b>	Séq. de type Écart
<b>SS</b>	Somme des carrés séquentielle
<b>S/N</b>	Signal/bruit
<b>Si</b>	Silicium
<b><math>\nu</math></b>	fréquence de la radiation électromagnétique

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## 0.1 CONTEXTE ET GÉNÉRALITÉS

Le soudage par faisceau laser est un procédé de soudage par fusion dans lequel deux pièces métalliques sont assemblées dues à l'effet thermique appliqué par le Laser. Le faisceau laser est dirigé vers la zone située entre les deux pièces métalliques, où il génère une grande quantité de chaleur pour faire fondre les bords du joint. Cette méthode est couramment utilisée dans les applications automatisées et de grand volume dans l'industrie automobile, et elle est basée sur le soudage en trou de serrure ou en mode pénétration. Le principal avantage du soudage au laser est sa capacité à faire fondre les bords du joint sans affecter une grande partie de la pièce, grâce à sa forte densité d'énergie [1]. Actuellement, la plupart des applications de soudage au laser sont réalisées à l'aide de lasers CO<sub>2</sub> ou Nd : YAG, qui sont bien développés. Cependant, d'autres types de lasers à haute radiance et à courte longueur d'onde sont en cours de développement et pourraient devenir des sources de soudage pratiques à l'avenir [2].

L'acier absorbe bien les longueurs d'onde de la lumière produite par les lasers CO<sub>2</sub> et Nd : YAG et de nombreux aciers sont facilement soudés par ce procédé. On trouve dans la littérature une série d'études décrivant l'utilisation réussie du soudage par faisceau laser (LB) sur différents aciers dans diverses applications industrielles [3-10]. Cependant, la soudabilité des aciers de construction est fortement influencée par leur composition chimique, en particulier leur teneur en C, P (phosphore) et S (soufre) et leur équivalent carbone [4]. La teneur en carbone des matériaux de construction modernes a été considérablement réduite, le renforcement provenant plutôt d'éléments d'alliage et/ou d'un traitement thermique pendant la stratification [4]. Ces aciers à grains fins sont particulièrement adaptés au procédé de soudage laser à faible apport de chaleur pour éviter le développement d'une microstructure à gros grains dans la région ZAC. Cependant, le faible apport de chaleur et le taux de refroidissement élevé (vitesse de soudage élevée) typiques de ce procédé favorisent la formation de microstructures dures et cassantes, telles que la martensite, dans les régions étroites de la soudure et dans la ZAC des aciers subissant des transformations de phase à l'état solide [4]. Comme les

valeurs de dureté atteintes dans ces régions sont généralement bien supérieures à celles spécifiées dans les normes et codes des soudures à l'arc conventionnelles, des procédures de qualification coûteuses et longues peuvent être nécessaires pour certains composants [11].

Cette étude traite de l'impact des paramètres du processus de soudage au laser, tels que la puissance du laser, la vitesse de soudage et le mode de soudage, sur la résistance à la traction du cordon de soudure. Les dimensions du cordon de soudure, qui sont affectées par les facteurs du processus, influencent grandement les propriétés mécaniques de la soudure laser. L'étude analyse les effets des paramètres du processus de soudage sur les propriétés mécaniques et métallurgiques de l'acier doux A36, de l'acier galvanisé A653 et de l'acier inoxydable 304L dans différentes conditions de soudage afin d'optimiser les performances mécaniques, de maximiser la pénétration et de réduire la largeur de la zone de fusion et de la zone affectée par la chaleur (ZAC) [12]. Les modèles mathématiques qui relient les propriétés clés du cordon de soudure aux facteurs de soudage utilisés dans le soudage au laser sont très utiles pour déterminer le meilleur ensemble possible de variables d'entrée pour le soudage au laser, ce qui est essentiel pour produire des soudures de haute qualité.

Les paramètres du processus sont souvent optimisés à l'aide de plans d'expériences (DOE) et de techniques statistiques. En ajustant les facteurs du processus de soudage par faisceau laser, la microdureté et la résistance à la traction de la soudure résultante peuvent être améliorées. Un réseau orthogonal L9 a été utilisé comme modèle expérimental de choix dans les trois analyses. Trois critères de soudage à trois niveaux ont été utilisés pour choisir cet arrangement. Dans les trois études, la puissance du laser, la vitesse de soudage et les techniques de soudage ont été sélectionnées comme étant les paramètres de soudage d'intérêt. L'analyse du rapport signal/bruit (S/N) est utilisée pour établir la valeur de chaque paramètre du processus. Deux types de caractéristiques de qualité peuvent être utilisés dans l'analyse du rapport signal/bruit (S/N) : la largeur de la corde (plus elle est petite, mieux c'est) et la résistance à la rupture (plus elle est élevée, mieux c'est).

Pour atteindre une résistance à la traction optimale, les chercheurs dans ces études recherchent le rapport S/N le plus élevé afin de déterminer le meilleur réglage des

paramètres de processus pertinents [13]. Ainsi, les meilleurs réglages pour le processus peuvent être anticipés [13]. En outre, une ANOVA a été réalisée pour montrer quels paramètres du processus étaient les plus significatifs sur le plan statistique. Ce court article commence par une définition du soudage, puis aborde les techniques de soudage les plus populaires et fournit quelques exemples des joints de soudure les plus connus.

Le processus de soudage au laser et les mécanismes sous-jacents impliqués, ainsi que les paramètres qui régissent le processus et leurs effets potentiels sur la qualité des soudures, ont été examinés. Les sections suivantes soulignent l'importance du projet, sa valeur et la manière dont il peut bénéficier à la communauté des affaires. Ce paragraphe présente également les trois principales méthodes utilisées pour améliorer les performances mécaniques et microstructurelles des spécimens soudés au laser en acier doux, en acier galvanisé et en acier inoxydable, ainsi que les principaux résultats de chaque méthode.

## **0.2 LE SOUDAGE AU LASER**

Le soudage est un procédé de fabrication qui permet d'assembler des matériaux, le plus souvent des métaux ou des thermoplastiques, mais aussi du bois, en appliquant une chaleur intense, en fusionnant les pièces ensemble, puis en les laissant refroidir, ce qui provoque la fusion. Le joint soudé obtenu est appelé une soudure. Aujourd'hui, il existe plusieurs méthodes de soudage, les outils sont nombreux et peuvent être choisis en fonction des besoins, des moyens mais aussi des propriétés et de la géométrie des pièces à souder etc [14]. Certains procédés de soudage relèvent d'une catégorie et d'autres d'une autre, en fonction du phénomène physique sous-jacent ou de la technologie de soudage. Le soudage à l'arc, qui utilise un faisceau à haute énergie plutôt qu'une flamme nue, est le procédé le plus courant. Actuellement, ils peuvent être classés en quatre types principaux [14] :

- SMAW (Soudage à l'arc sous protection métallique), plus connu sous le nom de soudage à l'arc, est la technique de soudage la plus courante.
- GMAW ou MIG (Soudage à l'arc sous protection gazeuse) caractérisé par l'explosion de l'arc électrique dans un gaz protecteur recouvrant le fil électrode et le métal de base.

- GTAW ou TIG (Soudage à l'arc en tungstène) qui nécessite l'utilisation d'une électrode en tungstène et d'un gaz inerte.
- SAW (Soudage à l'arc submergé), une électrode solide consommable ou tubulaire (âme métallique) est constamment alimentée dans un arc submergé. Un flux granulaire composé de chaux, de silice, d'oxyde de manganèse, de fluorure de calcium et d'autres composés est utilisé pour « submerger » la soudure fondue et la zone de l'arc, les protégeant ainsi de la contamination atmosphérique.

Il existe également des techniques de soudage qui fait intervenir des phénomènes thermoélectriques telles que le soudage par résistance. C'est une technique qui tire profit de l'effet Joule qui est la manifestation thermique de la résistance électrique qui se produit lors du passage d'un courant électrique dans tout matériau conducteur [15].

Le soudage par résistance utilise donc la différence de résistivité électrique entre les matériaux pour générer de la chaleur qui va mener les matériaux à fusion pour permettre le soudage. L'industrie automobile fait largement appel à cette méthode pour la construction des coques de véhicules [16]. D'autres méthodes sophistiquées sont également disponibles, comme le soudage par faisceau d'électrons, qui résulte de l'émission et de l'accélération d'un flux de particules de manière à leur fournir une énergie cinétique qui sera libérée sous forme de chaleur au moment de l'impact des particules sur le matériau [17]. Néanmoins, cette technique présente certains inconvénients qui ralentissent son utilisation à grande échelle, notamment la nécessité d'une chambre à vide et la difficulté d'obtenir un faisceau stable [18]. L'avancée la plus récente en matière de soudage est le soudage par friction-malaxage, qui consiste à utiliser la chaleur générée par le frottement entre les matériaux pour obtenir une soudure. Cette technique récente a été brevetée en 1991 [19]. Le grand avantage de cette technique est que les matériaux restent dans un état solide tout au long du processus. Cependant, le soudage par friction-malaxage n'a montré une réelle efficacité que sur les métaux légers (aluminium, magnésium, etc) avec une configuration limitée [20].

### **0.2.1 Le principe de fonctionnement du laser**

Essentiellement, le laser (acronyme de « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ») se présente comme un dispositif qui, en amplifiant un faisceau lumineux

dans un résonateur, émet un rayonnement cohérent dans le temps et dans l'espace. L'absorption, l'émission stimulée et l'émission spontanée sont les trois principes physiques qui décrivent l'interaction de l'atome avec la lumière et constituent la base du principe de fonctionnement du laser [21].

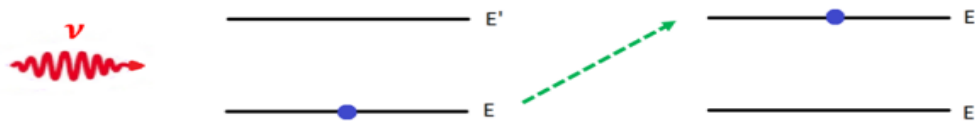
- L'absorption

La lumière provenant d'une source électromagnétique peut déplacer un atome de son état fondamental  $E$  à son état excité  $E'$  ( $E' > E$ ), lui permettant ainsi d'utiliser plus efficacement l'énergie de la source de rayonnement.  $E$  et  $E'$  sont deux niveaux d'énergie et le gain d'énergie est obtenu grâce à un photon de rayonnement absorbé qui est décrit comme le phénomène d'absorption. La différence entre les deux niveaux d'énergie correspond à l'excès de l'énergie apportée par le photon donné par la formule :

$$h\nu = E' - E$$

Avec  $h$  : Constante de Planck

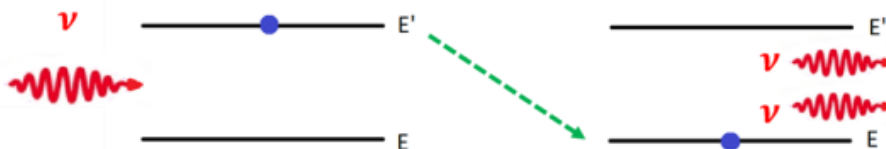
$\nu$  : fréquence de la radiation électromagnétique



**Figure 0.1** Principe d'absorption

- L'émission stimulée

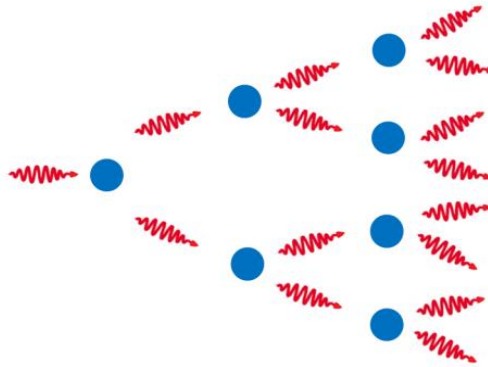
L'émission stimulée est un phénomène qui se produit lorsque l'atome  $E'$  se désexcite pour revenir à son niveau d'énergie initial  $E$  et libère en même temps l'énergie excédentaire sous forme de photon dans une direction aléatoire.



**Figure 0.2** Émission stimulée

- L'émission spontanée

L'effet laser repose principalement sur l'émission spontanée. Lorsque les atomes sont tous dans un état excité, un atome émettra un photon par émission stimulée comme expliqué ci-dessus, et ce photon provoquera une réaction en chaîne d'émissions stimulées jusqu'à ce qu'une puissance élevée soit atteinte, à partir de laquelle le faisceau laser. C'est cette réaction en chaîne qu'on décrit par émission spontanée.



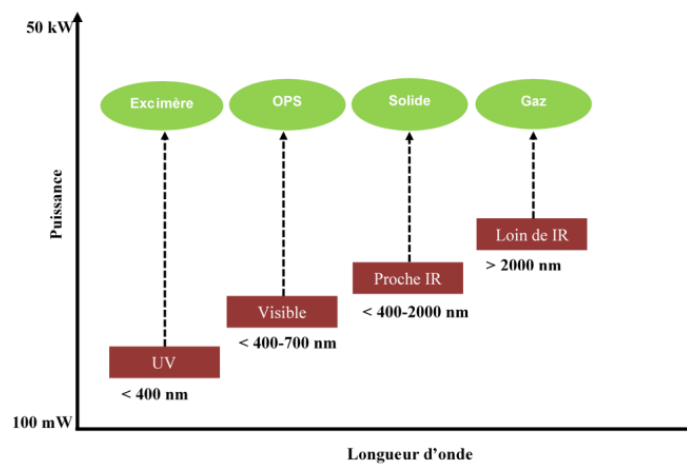
**Figure 0.3** Émission spontanée

D'après ces informations, les matériaux suivants sont nécessaires pour construire un laser :

- un milieu amplificateur, également appelé source laser, qui constitue la partie qui sera excitée pour générer les émissions de photons. Il définit les propriétés du laser et peut être sous forme de divers états (solide, gaz...) dépendamment de la matière utilisée
- La source d'énergie est l'élément du système qui fournira l'énergie requise pour l'excitation du milieu d'amplification. L'énergie peut provenir de diverses sources, dont la lumière et l'électricité. Ces deux sources sont de loin les plus courantes. Alfred Kastler a inventé le terme « pompage » en 1966 pour décrire le processus d'excitation atomique à partir d'une source extérieure.
- Système laser constitué d'une cavité résonnante qui recycle les photons et les émet de manière unidirectionnelle via un jeu de miroirs dont les propriétés varient en fonction des exigences du dispositif.

En plus de ces trois composants, il y a également les équipements pour le transport du faisceau émis. De nos jours, la fibre optique est considérée comme la manière la plus

performante de transmettre le faisceau laser, car l'apparition de faisceaux de petite longueur d'onde est un facteur déterminant. Néanmoins, pour les lasers de très haute puissance, les miroirs restent la seule alternative pour les transporter. Pour le soudage laser et autres procédés qui nécessitent un laser de haute puissance et une concentration du faisceau sur un point précis pour éviter sa dispersion, une lentille est placée à la sortie du faisceau pour stabiliser le faisceau et permettre la réalisation des différents procédés. Les lasers peuvent être classifiés en plusieurs selon leurs caractéristiques comme le type de source utilisée (solide, gaz, etc), la longueur d'onde (UV, visible, IR, etc), la puissance (faible ou fort) ou encore le mode d'émission (continue, pulsée) [22].



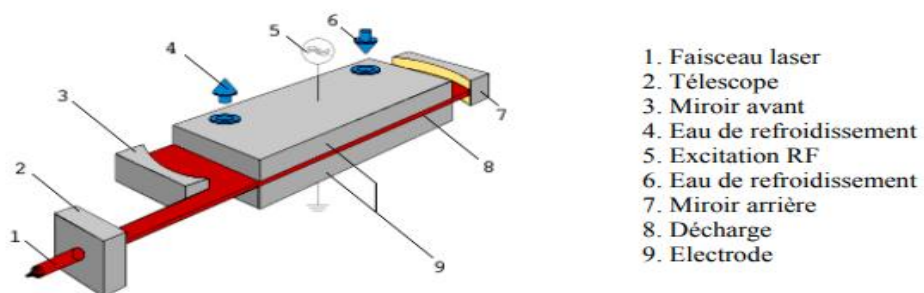
**Figure 0.4** Type de laser

Il existe cinq grands types de lasers basés sur la nature du milieu excité : les lasers à solide, à gaz, à semi-conducteurs, à liquide et à électrons libres. Les lasers Nd:YAG et les lasers à dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) sont les lasers les plus utilisés dans le secteur industriel pour la transformation des matériaux, notamment le soudage des métaux [23].

Pour produire un laser d'une longueur d'onde de 1,06 m, les lasers Nd-YAG utilisent un support actif cristallin en grenat d'aluminium-yttrium (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) dopé avec 1020 ions néodyme trivalents (Nd<sup>3+</sup>). La puissance moyenne et l'interaction des matériaux peuvent être augmentées à partir d'un laser Nd-YAG à l'état solide, qui peut être utilisé en mode pulsé ou continu. Bien qu'ils aient été conçus pour le micro-soudage de précision, ils sont désormais couramment utilisés pour souder des tôles dans les industries automobile et aérospatiale. En raison de leur longueur d'onde relativement courte, les lasers Nd : YAG



peuvent être transmis par des fibres optiques sur une distance de quelques dizaines de mètres. Les lasers à gaz qui utilisent les niveaux de vibration-rotation des molécules de CO<sub>2</sub> dans un mélange basse pression d'azote et d'hélium sont appelés lasers moléculaires (0,1 bar). Les électrons d'une décharge électrique excitent d'abord les molécules d'azote, qui transfèrent ensuite leur énergie aux molécules de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) voisines par des collisions inélastiques. Les lasers CO<sub>2</sub> génèrent un faisceau très focalisé avec une longueur d'onde de 10,6 mètres. Ils sont plus performants que les lasers Nd-YAG dans les applications de soudage en raison de leurs niveaux de puissance élevés (0,1 à 45 kW). Le transport des faisceaux laser CO<sub>2</sub> par des fibres n'est pas possible à cette longueur d'onde, Il faut donc utiliser des miroirs en métal traité et refroidi. Les technologies du laser CO<sub>2</sub> varient selon la méthode de refroidissement utilisée. Deux facteurs déterminent l'efficacité de ces méthodes et la quantité d'énergie que l'on peut tirer de la cavité. Les trois principaux types de lasers CO<sub>2</sub> utilisés pour la découpe sont le laser CO<sub>2</sub> à flux axial, le laser CO<sub>2</sub> à flux transversal et le laser CO<sub>2</sub> à plaque (**Figure 0.5**) [24].

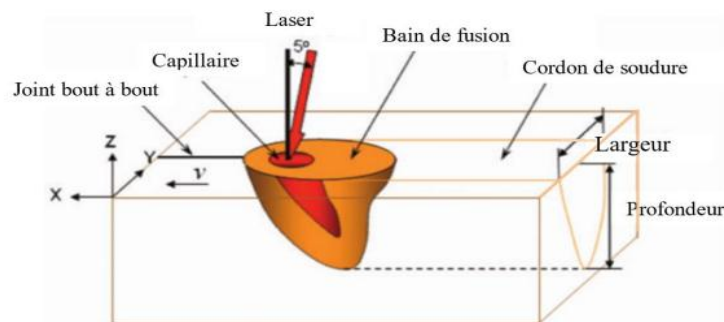


**Figure 0.5** Laser CO<sub>2</sub> SLAB [24]

Pour les lasers CO<sub>2</sub> SLAB, qui sont les technologies utilisées dans ce travail, le résonateur optique est composé de miroirs avant (3) et arrière (7) et de deux électrodes RF parallèles (9) (**Figure 0.5**). L'excitation (5) du gaz de laser a lieu dans le domaine de RF entre les électrodes refroidies à l'eau. La chaleur produite dans le gaz est absorbée par les électrodes refroidies à l'eau. Le faisceau rectangulaire est envoyé dans un télescope (2) muni d'un filtre spatial, ce qui améliore sa qualité et son uniformité en termes de distribution d'énergie ( $K > 0.9$ ). Cette technologie présente l'avantage d'être une source ultra compacte avec un rendement élevé.

## 0.2.2 Mécanisme du soudage laser

Un faisceau laser provoque une réaction en chaîne lorsqu'il frappe une surface. La réflexion initiale par la surface est suivie d'une absorption par la pièce sous forme d'énergie. Les tirs laser sont toujours effectués à un angle de plusieurs degrés pour éviter que la partie réfléchie n'endommage la tête du laser. La quantité de l'énergie absorbée par l'élément est directement liée à la longueur de l'onde du faisceau, au pouvoir réfléchissant de la surface et au facteur d'absorption du matériau. La température ambiante s'élève, car l'énergie absorbée est utilisée pour chauffer l'espace, ce qui augmente la température du corps. Une fois que cette chaleur s'est diffusée dans l'élément, elle peut le réchauffer. Dès que le composant atteint le point de fusion, il commence à fondre et à produire une flaque de matériau fondu. L'effet Marangoni est le principal mécanisme par lequel la chaleur est transférée dans le composant via le mouvement du fluide à l'intérieur du métal en fusion. Avec suffisamment de chaleur, le métal en fusion peut atteindre la température d'évaporation et commencer à s'évaporer [25]. Lorsque la vaporisation se produit, elle est principalement concentrée au point de contact du faisceau laser avec la pièce. Dans certaines conditions (équilibre des pressions, stabilité, etc.), la vaporisation peut prendre la forme de capillaires remplis de vapeur dans la pièce. Ce phénomène est illustré à la **Figure 0.6**. Le terme « soudage en trou de serrure » décrit cette technique.

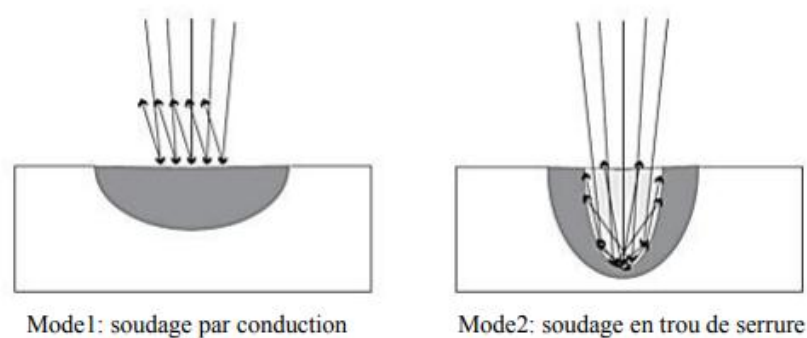


**Figure 0.6** Représentation schématique du soudage laser en trou de serrure [26]

Le métal fondu est ensuite utilisé pour construire les parois du capillaire. Grâce au capillaire, le faisceau laser peut pénétrer profondément dans la pièce, déposant de l'énergie dans toute l'épaisseur du matériau. Quand le faisceau est reflété à l'intérieur du capillaire, il interagit à plusieurs reprises avec les parois du capillaire, ce qui maximise

l'absorption du laser. Deux phénomènes, à savoir l'arrivée du faisceau à l'intérieur de la partie et sa réflexion dans le capillaire, contribuent à la profondeur de pénétration de la soudure en trou de serrure. Les vapeurs de métal peuvent se trouver à l'intérieur et à l'extérieur du capillaire, formant parfois un plasma lorsqu'elles réagissent avec l'air et le gaz de protection au-dessus de la soudure. Le problème du panache de plasma et de vapeur qui en résulte est que celui-ci dévie, absorbe et arrête une partie du faisceau laser, diminuant ainsi l'énergie qui atteint le composant. Il faut donc utiliser un jet d'air pour contourner ce problème. Le laser chauffe et fait circuler le bain de fusion (avec capillaire, si nécessaire) entre les pièces à assembler. Le cordon de soudure, qui est une bande de métal solide reliant les pièces, se forme dès le passage du faisceau, refroidissant et solidifiant instantanément le métal.

Il existe donc deux principaux types de soudage au laser : le soudage par conduction et le soudage par trou de serrure. Ces deux types de soudage sont illustrés à la **Figure 0.7**.



**Figure 0.7** Représentation des deux modes de soudage laser[25]

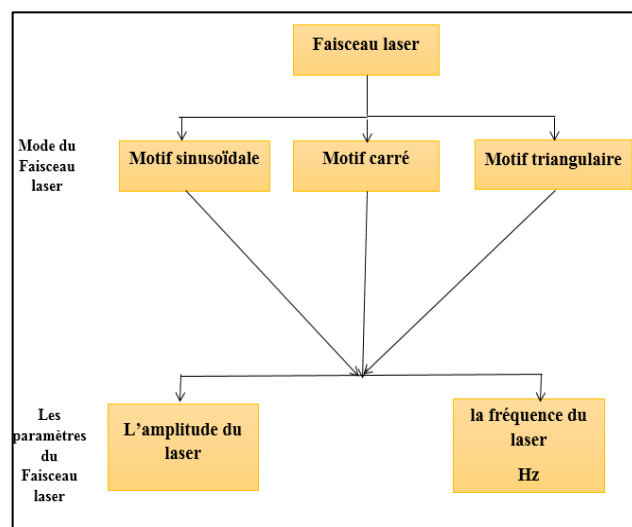
La géométrie arrondie et la profondeur au moins deux fois supérieure observées dans les soudures par conduction sont le résultat de l'absence de création d'un capillaire de vapeur. Par rapport à leur largeur, les soudures en trou de serrure ont une profondeur beaucoup plus grande. On estime généralement que les soudures à pénétration profonde nécessitent une densité de puissance d'environ  $10^6 \text{ W/cm}^2$ . Une gamme de densités de puissance, qui dépend à son tour de la vitesse du laser et du diamètre, définit la limite réelle entre ces deux modes de soudage [26]. Un capillaire de vapeur stable ne peut pas être établi dans la région de transition parce que la pression générée par la vaporisation du métal est insuffisante pour vaincre la surface de la masse fondue. La partie fondue, la partie affectée par la chaleur et le matériel de base sont les trois régions typiques qui peuvent être

identifiées dans une soudure après sa solidification. Lorsque les températures s'élèvent au-dessus de leur point de fusion, une nouvelle microstructure se forme dans le matériau, et cette région. Le soudage par conduction constitue ici le Mode1. La zone fondue du soudage en trou de serrure Mode2 est située dans la zone 6. En s'éloignant de la partie fondue, les changements de microstructure s'atténuent avec le temps et la température. C'est dans cette zone que l'austénitisation se produit dans l'acier, entraînant le durcissement du matériau. Toutes les régions non altérées d'un composant soudé sont considérées comme la base.

### 0.2.3 Paramètre du soudage laser

La géométrie optimale du cordon et la qualité du soudage laser peuvent être obtenues en ajustant un certain nombre de paramètres. Plus précisément, ces variables sont les suivantes [27, 28] :

- Données sur le faisceau du laser (**voir Figure 0.8**) : l'intensité, la largeur, la longueur et le mode de fonctionnement (pulsé ou continu), etc.
- Détails sur les composants de la soudure, tels que leur matériau, leurs propriétés mécaniques, leur finition de surface, leurs dimensions, etc.
- Positionnement : configuration, vitesse, position du point focal, etc.
- Gaz de protection, haute pression, etc.



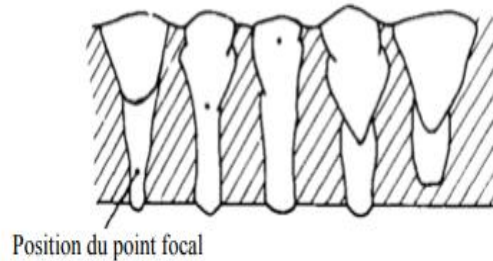
**Figure 0.8** Schéma des modes et les paramètres de faisceau laser

Les faisceaux pulsés et continus peuvent être utilisés pour la soudure, les premiers étant plus adaptés à la soudure par points et les seconds à la soudure continue. La technologie des faisceaux pulsés introduit de nouvelles variables, telles que la durée, la forme et la fréquence des impulsions. Cependant, si les impulsions sont sélectionnées pour se chevaucher, un faisceau pulsé peut être utilisé pour créer des effets sur l'environnement. Un faisceau pulsé peut produire des soudures deux fois plus profondes que celles produites par un faisceau continu tout en utilisant la même puissance moyenne. Un laser d'une puissance deux fois supérieure serait nécessaire dans ce cas [25].

Le processus de soudage au laser peut être aisément réglé en termes de vitesse et de puissance. La vitesse de soudage est directement proportionnelle à la puissance appliquée à la pièce (vitesse du faisceau laser). Une soudure plus profonde et plus étroite est obtenue à des vitesses plus élevées que l'inverse. Toute la puissance est gérée par un ordinateur.

La pénétration de la soudure peut être améliorée en ajustant cette puissance, car elle affecte directement la puissance volumique que reçoit la pièce. Il existe généralement plusieurs combinaisons puissance/vitesse qui peuvent être utilisées pour souder une épaisseur de pièce donnée. Cependant, la vitesse maximale est généralement choisie, car elle correspond à la meilleure utilisation de la puissance disponible.

La dimension de la tache focale est directement proportionnelle à la taille de l'ouverture (diamètre du faisceau). Il se peut que le laser soit ajusté en fonction de la façon dont il a été installé. Comme une tache focale plus petite peut concentrer plus de puissance dans une zone donnée, la pénétration du laser peut être améliorée sans recourir à des niveaux de puissance globale plus élevés. Cependant, l'utilisation d'une très faible tache focale exige une très bonne précision de positionnement du laser tout au long du processus. L'utilisation de points focaux trop petits est limitée par cette condition. Comme le montre la **Figure 0.9**, l'aspect visuel du soudage dépend de la taille du point focal, mais également de son emplacement relatif à la surface de la pièce. Le plus souvent, vous trouverez le meilleur rapport pénétration/largeur à quelques millimètres sous la surface supérieure de la pièce. Pour déterminer cet emplacement, la méthode la plus courante consiste à effectuer une soudure en augmentant progressivement la distance entre la pièce et la tête du laser [27]. Par conséquent, l'emplacement idéal est identifié en observant.



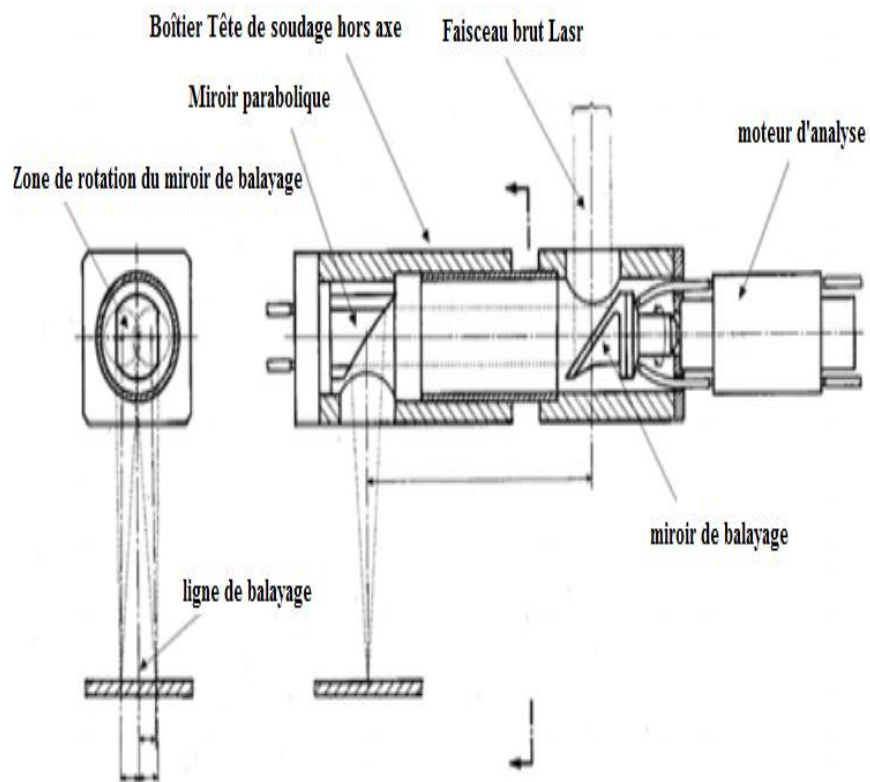
**Figure 0.9** Effet de la position du point focal sur la forme de la soudure [27]

### 0.3 Faisceau laser oscillant

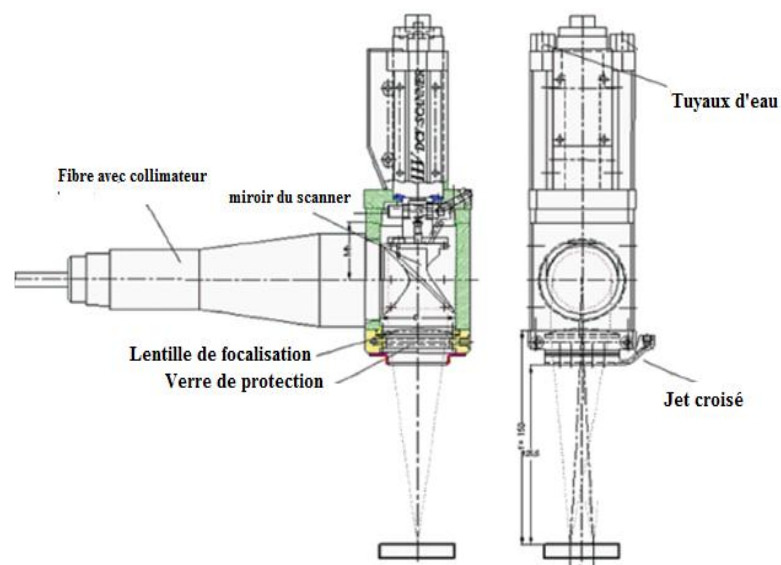
Depuis que la technologie laser a été introduite dans la technique de soudage, les chercheurs ont rapidement mis au point des systèmes laser pulsés, une technologie à faisceaux successifs et de nombreuses variantes de soudage laser hybride. Outre ces techniques éprouvées, l'accent est mis sur les opérations de manipulation des processus à l'aide de systèmes de balayage optique. Des miroirs mobiles sont incorporés dans la trajectoire du faisceau entre le laser et la pièce à usiner et font osciller le faisceau à intervalles réguliers. Cela permet de générer une variété de modèles d'oscillation, chacun pouvant avoir un effet unique sur l'énergie déposée [29].

#### 0.3.1 Système de scanner ILV DC

En utilisant le DC-Scanner pour des applications de soudage au laser, la largeur de la soudure peut être dans une plage relativement large. Il est donc possible de souder des pièces dont les tolérances d'écartement et de géométrie sont déjà trop élevées pour le soudage laser ordinaire. Cela vaut pour tous les types de préparation de joints tels que les joints bout à bout, les joints d'angle et les joints à recouvrement. Le DC-Scanner peut servir au traitement de surface au laser (trempe par transformation, refusion, placage et alliage). Selon les distances focales du miroir ou de la lentille de focalisation, des miroirs ou de la lentille, des largeurs de balayage jusqu'à 50 mm sont possibles pour des fréquences de balayage  $\leq 120$  Hz. Le DC-Scanner est adaptable à une variété de miroirs de focalisation paraboliques et de têtes de soudage hors axe utilisés dans l'industrie du soudage par faisceau de fibres [30].



**Figure 0.10** Schéma d'un scanner pour la formation dynamique de faisceaux en combinaison avec des lasers CO<sub>2</sub> [30]



**Figure 0.11** Schéma d'un scanner pour la formation dynamique de faisceaux en combinaison avec des lasers de haute puissance couplés à des fibres[31].

La **Figure 0.10** et la **Figure 0.11** montrant la configuration principale d'un scanner linéaire à utiliser avec des lasers haute puissance couplés à des fibres et CO<sub>2</sub>. L'unité de miroir du scanner remplace l'unité de pliage du faisceau à 90 degrés (d'autres angles sont également possibles) à l'intérieur de la tête de soudage. Un moteur à entraînement direct fait tourner le miroir du scanner selon un angle contrôlé d'avant en arrière. Le scanner peut fonctionner avec des fréquences allant jusqu'à 1000 Hz. Le site largeur de balayage réalisable dépend de la fréquence choisie. Avec une distance focale du miroir parabolique/lentille de focalisation de 200 mm, on peut obtenir des largeurs de balayage allant jusqu'à 15 mm. Le miroir est ramené à sa position zéro d'origine au moyen d'un ressort de précision à haute résistance. Le miroir standard du scanner pour les lasers CO<sub>2</sub> est en cuivre pur non revêtu et à haute résistance. Pour d'autres types de lasers, d'autres matériaux ou revêtements sont également disponibles. Le miroir du scanner est directement refroidi par eau. La température du miroir est mesurée, contrôlée et affichée sur l'unité de contrôle. À l'état éteint, le miroir du scanner fonctionne comme un miroir de renvoi normal. Il n'est donc n'est pas nécessaire de le retirer pour les applications où le balayage n'est pas souhaité. Les pics d'énergie sur les points de retournement de la ligne de balayage ne sont généralement pas négatifs sur les applications de soudage. Pour les besoins spécifiques et les applications de durcissement de la transformation, un plug pour le contrôleur est disponible. Avec cette option, différents niveaux de puissance laser peuvent être programmés le long de la ligne de balayage [30].

#### **0.4 PROBLEMATIQUE**

En raison de ses nombreux avantages par rapport aux procédures de soudage traditionnelles, le soudage par faisceau laser s'est rapidement imposé dans l'industrie manufacturière. Grâce à sa rapidité, son efficacité et son adaptabilité, le soudage au laser est idéal pour un large éventail de situations (air, gaz de protection et sous vide). Cette méthode d'assemblage a gagné en popularité en raison de son haut niveau de qualité, de précision, d'efficacité, de performance, d'adaptabilité et de rapidité. La robotique, l'automatisation, les économies de main-d'œuvre, la systématisation, etc. en bénéficient toutes. Étant donné qu'il ne nécessite aucun matériau d'apport, qu'il a une largeur étroite et une pénétration profonde, qu'il est mécaniquement plus solide, qu'il résiste mieux aux vibrations et aux chocs, qu'il endommage moins les composants sensibles à la chaleur



pendant l'assemblage et qu'il augmente la fiabilité, le soudage par faisceau laser est une alternative prometteuse au soudage et aux adhésifs conventionnels[32]. La distorsion thermique minimale, la procédure sans contact, la répétabilité, le potentiel d'automatisation et la haute efficacité du laser ont conduit à une reconnaissance, une acceptation et une appréciation généralisées de la communauté industrielle. 'adaptabilité du laser lui a permis de remplacer d'autres types de technologies de soudage, comme le soudage par résistance (par points et à la molette), le soudage sous gaz inerte, les ultrasons et le soudage par faisceau d'électrons [33].

La précision, le faible coût, la grande fiabilité et l'automatisation du soudage au laser ont conduit à son adoption rapide dans de nombreux secteurs, de la microélectronique à la construction navale, ces dernières années [34]. Le soudage est couramment utilisé dans le secteur automobile pour assembler des éléments de petite taille, complexes, préfabriqués et sensibles à la chaleur, comme les injecteurs de carburant et les carrosseries de voiture, car le produit complet ne peut être fabriqué à partir d'une seule pièce. Les récents développements de la technologie des lasers à l'état solide Nd : YAG ont conduit à la mise au point de disques et de fibres qui émettent dans la région du proche infrarouge, entre 1,03 et 1,07 micron, ce qui a ravivé et développé l'intérêt pour l'utilisation de ces lasers dans le processus de soudage. Comme cette longueur d'onde peut être transmise plus efficacement à travers une fibre, ces lasers ont surpassé les lasers CO<sub>2</sub> dans de nombreux environnements de fabrication, notamment ceux impliquant des robots humanoïdes. En outre, la qualité du faisceau des lasers modernes est si excellente que nous sommes pratiquement à la limite de la diffraction, ce qui a conduit à une augmentation de la fiabilité, de l'efficacité et de la puissance à onde continue (CW) jusqu'à des dizaines de kilowatts. Leur adaptabilité, leur efficacité et leur haute qualité les ont rendus courants dans les techniques d'assemblage.

Les lasers à fibre de haute puissance, à haut rendement ou de haute qualité, ainsi que d'autres sources laser, notamment les lasers CO<sub>2</sub> et YAG, ont contribué à l'adoption généralisée du soudage laser. Toutefois, dans des conditions défavorables, les défauts ou dysfonctionnements de soudage peuvent entraîner la défaillance d'un produit ou d'une structure, voire une catastrophe. Pour garantir la production de constructions ou de produits sûrs, de haute qualité et fiables à l'aide d'un faisceau laser, il est nécessaire de

mettre en œuvre des procédures et des mesures de prévention des défaillances de soudage fondées sur la compréhension des mécanismes de formation des phénomènes de soudage, de leurs conditions et de leurs mécanismes[35].

Le récent regain d'intérêt pour le procédé industriel éprouvé de soudage par faisceau laser oscillant [36] est dû en grande partie à la disponibilité de lasers haute puissance peu coûteux, dotés d'une qualité de faisceau supérieure et d'une puissance de sortie presque infinie. L'oscillation du faisceau à haute fréquence a été étudiée pour son potentiel d'amélioration de la cohérence du soudage au laser. L'amélioration des techniques de gestion du faisceau est rendue possible par la stabilisation du processus de soudage à haute puissance [37]. Bien que les soudures générées par les faisceaux de haute puissance présentent un excellent rapport profondeur/largeur, leur application est limitée par la nécessité de réaliser des joints extrêmement précis [38].

Les paramètres de la soudure doivent être ajustés de manière à ce que la zone fusionnée ait une plus grande profondeur et une plus petite largeur [39]. Alexandra P Costaa *et al.* [40] ont utilisé un laser CO2 haute puissance et un laser Nd : YAG pour expérimenter le soudage par faisceau laser de métaux durs à l'acier et étudier la soudabilité par faisceau laser de métaux durs à l'acier. Padmanabhan G *et al.* [41] ont étudié comment maximiser la résistance à la traction de l'alliage de magnésium AZ31B par le soudage par faisceau laser, et ont découvert que le facteur le plus important était la vitesse de soudage, suivie de la puissance du laser et de la position focale. Balasubramian K R *et al.* [42] ont comparé le modèle de réseau neuronal à un modèle de régression linéaire multiple et ont travaillé sur la modélisation mathématique et ANN du soudage au laser Nd : YAG de fines feuilles d'acier inoxydable. Dhavalkumar K Soni *et al.* [43] ont utilisé un laser à fibre pour tester le processus de soudage au laser et prévoir ses résultats pour des tôles d'acier doux 2062 de 1 mm. Avec l'aide de Design Expert, ils ont réussi à réaliser l'expérience et à planifier le travail expérimental. À l'aide de MATLAB, ils ont construit un réseau neuronal artificiel (ANN) pour faire des prédictions sur les réponses à produire.

En émettant des impulsions sur le joint selon un motif prédéterminé, le laser peut surmonter ce problème pendant l'oscillation [44]. La réduction de l'empreinte de la tête du procédé favorise l'accessibilité du joint et l'adaptabilité globale du procédé [45, 46].

c'est pourquoi les nouveaux développements dans les équipements émetteurs de faisceaux sont bénéfiques à la croissance des domaines d'application existants. L'oscillation du faisceau répartit son énergie sur une zone plus large et améliore la région dans laquelle cette énergie est appliquée, ce qui permet d'obtenir des joints entièrement pontés et sans défaut et présentant des caractéristiques géométriques de haute qualité, mais au prix d'une vitesse de traitement un peu plus lente et d'un temps de traitement plus long [47]. Un autre avantage est la capacité de l'oscillation du faisceau à contrôler le temps de refroidissement, ce qui est particulièrement utile pour assembler des matériaux incompatibles comme les aciers à haute résistance et les alliages d'aluminium utilisés dans les secteurs automobile et aérospatial [48]. Pour les joints à recouvrement en zinc et en acier AISI 304, les études démontrent que le soudage avec un faisceau de petit diamètre à faible puissance avec oscillation est préférable au soudage laser traditionnel. Il a toutefois été souligné que la connaissance du comportement du matériau est cruciale pour l'application efficace de cette méthode [49, 50].

## **0.5 OBJECTIFS**

L'objectif principal de ce mémoire est de développer des modèles prédictifs du comportement mécanique et des performances microstructurelles des soudures en menant à bien une série d'études scientifiques et méthodiques sur le soudage au laser de l'acier inoxydable AISI 304L, de l'acier doux ASTM A36 et de l'acier galvanisé ASTM A653. Dans cette étude, trois motifs de faisceau laser oscillant (sinusoïdal, triangulaire et carré) avec deux facteurs de soudage variables (puissance du laser et vitesse de soudage) et deux facteurs constants (amplitude d'oscillation et fréquence du laser) ont été réalisés pour souder des tôles de 1,8 mm d'épaisseur de chaque type d'acier sur une configuration en bout à bout. Une série de sous-objectifs correspondant à des phases distinctes du projet de recherche est nécessaire pour atteindre ces objectifs. Le respect de ces procédures permet l'utilisation de méthodes statistiques pour examiner l'influence des facteurs du procédé sur la qualité des soudures et la mesure dans laquelle ils contribuent à la variation de ces différentes caractéristiques. En suivant ces procédures, plusieurs modèles de prédiction sont développés et évalués sur la base de critères prédéterminés afin de sélectionner le plus fiable et le plus précis.

Le premier objectif de ce mémoire est d'étudier les effets des paramètres de soudage au laser (puissance du laser et vitesse de soudage) sur l'acier doux ASTM A36 pendant le soudage par trois motifs de faisceau laser oscillant (sinusoïdal, triangulaire et carré). Les effets de la puissance et de la vitesse de soudage sur la résistance à la traction et la microdureté doivent être étudiés. Le second objectif de ce mémoire est l'optimisation des effets des paramètres de soudage laser sur l'acier galvanisé ASTM A653 en utilisant la méthode de surface de réponse. Les critères de valorisation retenus dans cette étude, à savoir la microstructure et les propriétés mécaniques, peuvent être utilisés conjointement avec les résultats du travail d'optimisation pour déterminer les meilleurs paramètres de soudage possibles. Le troisième objectif est de trouver les paramètres optimaux de soudage des plaques d'acier inoxydable 304L en utilisant la méthode de désirabilité.

## **0.6 MÉTHODOLOGIE**

Le projet de recherche en cours, intitulé "Modélisation et optimisation de la technique d'oscillation de faisceau pour le soudage au laser des alliages d'acier doux A36, inoxydable 304L et galvanisé A653", a été mené au Département de mathématiques, d'informatique et d'ingénierie de l'UQAR. L'objectif du projet était de trouver la meilleure combinaison de paramètres de processus de soudage au laser pour obtenir des résultats optimaux pour trois types d'acier différents. Pour atteindre cet objectif, la recherche a utilisé une stratégie évolutive. La première partie du projet visait à déterminer l'effet de l'oscillation sur le soudage au laser d'un alliage d'acier doux ASTM A36 et à optimiser le processus pour obtenir les meilleurs résultats en utilisant l'oscillation du faisceau dans le soudage au laser. Plusieurs cycles de soudage au laser ont été réalisés en utilisant un plan d'expériences Taguchi définissant un L9 qui prenait en compte neuf combinaisons différentes de divers niveaux de paramètres. Les propriétés mécaniques de la soudure étaient l'objectif final, et les soudures ont été testées mécaniquement selon la norme ASTM E8, ainsi que par des tests de microdureté. Les données ont été analysées à l'aide d'outils statistiques tels que l'analyse de la variance (ANOVA) pour déterminer l'effet des différents facteurs sur la qualité de la soudure. Les résultats ont été utilisés pour créer un modèle de prédiction capable de prévoir les propriétés mécaniques de la soudure en fonction des facteurs pertinents. Ce modèle a été utilisé pour optimiser les paramètres en utilisant une surface de réponse afin de trouver les meilleurs réglages pour l'oscillation du

faisceau dans le soudage au laser. La méthodologie de la surface de réponse a ensuite été appliquée au soudage au laser de plaques d'acier galvanisé A653 dans une configuration bout à bout en identifiant et en analysant les effets des paramètres de soudage au laser (puissance du laser, vitesse et mode de soudage) sur les performances mécaniques. La dernière partie du projet était axée sur l'optimisation des effets des paramètres de soudage au laser (puissance, vitesse et mode de soudage) pour les plaques d'acier inoxydable 304L soudées en bout à bout. Les résultats de l'exploration ont été utilisés pour définir les plages de paramètres qui seraient utilisées pour construire l'expérience, et des méthodes statistiques telles que l'analyse de la variance ont été utilisées pour déterminer l'importance et l'impact des paramètres sur les propriétés des soudures. La méthode de désirabilité a ensuite été appliquée pour trouver les valeurs optimales du processus en utilisant des outils informatiques tels que Minitab.

## **0.7 DIVISION**

Le mémoire est divisé en cinq parties : une introduction générale, trois chapitres individuels et une conclusion. Le premier chapitre aborde les bases du soudage laser et étudie les effets des paramètres de soudage au laser sur l'alliage d'acier galvanisé ASTM A36 en utilisant trois types d'oscillations différentes. Le deuxième chapitre étudie les effets des paramètres de soudage au laser sur la résistance à la traction, la microdureté et la microstructure de l'acier galvanisé ASTM A653 en utilisant la méthode de la surface de réponse. Le troisième chapitre présente une optimisation de la soudure laser appliquée à l'acier inoxydable 304L en utilisant la méthode de désirabilité pour trouver les paramètres optimaux de soudage. La conclusion résume les objectifs, les résultats et les liens confirmés de ce projet de recherche et souligne l'importance de ce mémoire pour les études futures.

## **REFERENCES**

- [1] K. Kalaiselvan, I. Dinaharan, and N. Murugan, "11899 Routes for the Joining of Metal Matrix Composite Materials," *Composites Science and Technology*, vol. 60, pp. 613-622, 2021.
- [2] J. F. Ready, *Industrial applications of lasers*. Elsevier, 1997.
- [3] P. Brown and J. Bird, "The laser welding of Q1N, HSLA80 and NSS550. IIW Doc," IX-679-961996.

- [4] G. Cam, S. Erim, C. Yeni, and M. Koçak, "Determination of mechanical and fracture properties of laser beam welded steel joints," *WELDING JOURNAL-NEW YORK-*, vol. 78, pp. 193-s, 1999.
- [5] G. Çam, Ç. Yeni, S. Erim, V. Ventzke, and M. Koçak, "Investigation into properties of laser welded similar and dissimilar steel joints," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 3, no. 4, pp. 177-189, 1998.
- [6] J. Kristensen and K. Borggreen, "Mechanical properties and microstructures of laser welded constructional steels," *DVS BERICHTE*, vol. 163, pp. 226-226, 1994.
- [7] E. Metzbower, "Laser beam welding: thermal profiles and HAZ hardness," *Weld. J.*, vol. 69, no. 7, p. 272, 1990.
- [8] P. Rippl, "Laser beam welding with robots in the automotive industry," *DVS BERICHTE*, vol. 163, pp. 151-151, 1994.
- [9] R. Strychor, D. W. Moon, and E. Metzbower, "Microstructure of ASTM A-36 steel laser beam weldments," *JOM*, vol. 36, no. 5, pp. 59-61, 1984.
- [10] Z. Sun and T. Moio, "Effect of processing parameters on laser welded dissimilar steel joints," *Welding Journal (Miami);(United States)*, vol. 73, no. 4, 1994.
- [11] U. Dilthey, M. Dobner, A. Ghandehari, F. Lüder, and G. Träger, "Entwicklung," *Stand und Perspektiven der Strahltechnik*, pp. 1-14, 1996.
- [12] K. Benyounis, A. Olabi, and M. Hashmi, "Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile," *Journal of materials processing technology*, vol. 164, pp. 978-985, 2005.
- [13] E. Anawa, A. Olabi, and F. Elshukri, "Modeling and optimization of tensile shear strength of Titanium/Aluminum dissimilar welded component," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, vol. 181, no. 1, p. 012033: IOP Publishing.
- [14] J. R. Davis, K. Ferjutz, and N. Wheaton, "ASM handbook, volume 6: welding, brazing and soldering," *ASM International, Materials, USA*, pp. 787-799, 1993.
- [15] H. Zhang and J. Senkara, *Resistance welding: fundamentals and applications*. CRC press, 2011.
- [16] V. Beik, H. Marzbani, and R. Jazar, "Welding sequence optimisation in the automotive industry: A review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 233, no. 17, pp. 5945-5952, 2019.
- [17] H. Schultz and R. Silva, "Principles of electron beam welding," IABG, Munich 1972.
- [18] M. S. Węglowski, S. Błacha, and A. Phillips, "Electron beam welding—techniques and trends—review," *Vacuum*, vol. 130, pp. 72-92, 2016.
- [19] D. Lohwasser and Z. Chen, *Friction stir welding: From basics to applications*. Elsevier, 2009.
- [20] V. P. Singh, S. K. Patel, A. Ranjan, B. J. J. o. M. R. Kuriachen, and Technology, "Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium–magnesium alloys: a critical review," vol. 9, no. 3, pp. 6217-6256, 2020.
- [21] E. Kannatey-Asibu Jr, *Principles of laser materials processing*. John Wiley & Sons, 2009.
- [22] S. Katayama, "Introduction: fundamentals of laser welding," in *Handbook of laser welding technologies*: Elsevier, 2013, pp. 3-16.
- [23] A. Belhadj, "Contribution à l'étude expérimentale et numérique du soudage laser: Application aux alliages de magnésium," Paris, ENSAM, 2009.

- [24] J. Schüttler, "3D Modeling of a Planar Discharge in a CO<sub>2</sub> Laser Using a Multilevel Approach," ed: Researchgate.
- [25] L. Jacques, *Modélisation prédictive par réseaux de neurones de la forme et des dimensions des joints de soudure par laser basée sur l'expérimentation et sur la simulation 3D*. Université du Québec à Rimouski (Canada), 2017.
- [26] E. Assuncao, S. Williams, and D. Yapp, "Interaction time and beam diameter effects on the conduction mode limit," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 50, no. 6, pp. 823-828, 2012.
- [27] A. Bharti, "Laser welding," *Bulletin of Materials Science*, vol. 11, no. 2, pp. 191-212, 1988.
- [28] W. M. Steen and J. Mazumder, *Laser material processing*. Springer science & business media, 2010.
- [29] A. Mahrle and E. Beyer, "Modeling and simulation of the energy deposition in laser beam welding with oscillatory beam deflection," in *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2007, vol. 2007, no. 1, p. 1805: Laser Institute of America.
- [30] A. Arlt, "User's Manual: ILV DC-Scanner," *ILV, Schwalbach*, 2009.
- [31] A. Arlt, "Laser Welding: Line Scanners for Beam Shaping and Guiding," *Fügen im Karosseriebau, Bad Nauheim, Germany*, 2012.
- [32] S. Katayama, "Defect formation mechanisms and preventive procedures in laser welding," in *Handbook of laser welding technologies*: Elsevier, 2013, pp. 332-373.
- [33] S. Katayama, S. Kawaguchi, M. Mizutani, Y. Kawahito, and T. J. W. I. Tarui, "Welding phenomena and in-process monitoring in high-power YAG laser welding of aluminium alloy," vol. 23, no. 10, pp. 753-762, 2009.
- [34] Y. Kawahito, M. Kito, and S. Katayama, "In-process monitoring and adaptive control for gap in micro butt welding with pulsed YAG laser," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 40, no. 9, p. 2972, 2007.
- [35] S. Katayama, "Formation mechanisms and preventive procedures of laser welding defects," in *Fundamentals and Details of Laser Welding*: Springer, 2020, pp. 87-111.
- [36] M. N. Zervas and C. A. Codemard, "High power fiber lasers: a review," *IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics*, vol. 20, no. 5, pp. 219-241, 2014.
- [37] G. Overton, A. Noguee, and C. Holton, "Lasers forge 21st century innovations," *LASER FOCUS WORLD*, vol. 50, no. 1, pp. 38-+, 2014.
- [38] M. Bachmann, A. Gumenyuk, and M. Rethmeier, "Welding with high-power lasers: Trends and developments," *Physics Procedia*, vol. 83, pp. 15-25, 2016.
- [39] C. Dawes, *Laser welding: a practical guide*. Woodhead Publishing, 1992.
- [40] A. P. Costa, L. Quintino, and M. J. J. o. m. p. t. Greitmann, "Laser beam welding hard metals to steel," vol. 141, no. 2, pp. 163-173, 2003.
- [41] G. Padmanaban, V. J. O. Balasubramanian, and L. Technology, "Optimization of laser beam welding process parameters to attain maximum tensile strength in AZ31B magnesium alloy," vol. 42, no. 8, pp. 1253-1260, 2010.
- [42] K. Balasubramanian, G. Buvanashakaran, and K. J. J. M. E. Sankaranarayanan, "Mathematical and ANN modeling of Nd: YAG laser welding of thin SS sheets," vol. 6, no. 2, pp. 56-60, 2007.

- [43] M. D. K. Soni and D. Patel, "An Experimental Investigation and Prediction of Laser Welding Process."
- [44] R. Martukanitz and L. Tressler, "Technology report-Mixing it up-Laser stir welding shows promise for the joining of aluminum alloys," *Industrial Laser Solutions-for Manufacturing*, vol. 21, no. 3, pp. 25-30, 2006.
- [45] M. Schweier, J. Heins, M. Haubold, and M. Zaeh, "Spatter formation in laser welding with beam oscillation," *Physics Procedia*, vol. 41, pp. 20-30, 2013.
- [46] M. Spöttl and H. Mohrbacher, "Laser-based manufacturing concepts for efficient production of tailor welded sheet metals," *Advances in manufacturing*, vol. 2, no. 3, pp. 193-202, 2014.
- [47] M. A. Vicente, J. Mínguez, and D. C. González, "The use of computed tomography to explore the microstructure of materials in civil engineering: from rocks to concrete," *Computed tomography-advanced applications*, pp. 207-230, 2017.
- [48] D. Dittrich, J. Standfuss, J. Liebscher, B. Brenner, and E. Beyer, "Laser beam welding of hard to weld Al alloys for a regional aircraft fuselage design—first results," *Physics Procedia*, vol. 12, pp. 113-122, 2011.
- [49] K. Hao, G. Li, M. Gao, and X. Zeng, "Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of austenitic stainless steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 225, pp. 77-83, 2015.
- [50] A. Müller, S.-F. Goecke, P. Sievi, F. Albert, and M. Rethmeier, "Laser beam oscillation strategies for fillet welds in lap joints," *Physics Procedia*, vol. 56, pp. 458-466, 2014.



## CHAPITRE 1

### **Optimisation du soudage au laser de l'acier doux ASTM A36 avec différents modèles d'oscillation du faisceau laser en utilisant des données expérimentales et de simulation**

Said Ouamer <sup>1</sup>, Nouredine Barka <sup>1</sup>, Asim Iltaf <sup>2</sup>, Karim Bensalem <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mathematics, Computer Science and Engineering, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, Canada

*Cet article a été soumis dans Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L portant le numéro de référence JMES-23-1890*

#### **1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE**

En raison de son utilisation accrue dans les raffineries de pétrole, les centrales électriques, l'industrie pharmaceutique et même dans les résidences, le soudage au laser de l'acier doux a récemment suscité beaucoup d'intérêt dans le secteur industriel. Dans cet article, trois types d'oscillations du faisceau laser (trajectoire sinusoïdale, trajectoire triangulaire et trajectoire carrée) ont été réalisés pour souder des tôles d'acier doux ASTM A36 de dimensions (125×60×1,8 mm) afin d'étudier les effets des paramètres du processus de soudage au laser (puissance du laser, vitesse de soudage) sur la résistance à la traction des soudures. Des outils statistiques tels que l'ANOVA ont été utilisés pour générer des modèles mathématiques précédés d'une conception expérimentale utilisant la méthode Taguchi. Les résultats montrent que le joint soudé optimal présente une bonne résistance mécanique après le soudage au laser. Les paramètres optimaux pour le soudage au laser sur l'acier doux ASTM A36 sont décrits comme suit : la puissance du laser de 1800 W, la vitesse de soudage de 50 mm/s et le mode de soudage triangulaire.

**Mots clés :** Soudage au laser, Acier doux ASTM A36, Taguchi, oscillations du faisceau laser, ANOVA.

Ce premier article, intitulé « *Optimization of laser welded ASTM A36 mild steel with different laser beam oscillation patterns utilizing experimental and simulation data* » a été rédigé conjointement par moi-même et le professeur Nouredine Barka. Il a été soumis pour publication dans sa version finale en 2022 par le *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L*. Comme premier auteur, ma contribution à ce travail a été la recherche essentielle sur l'état de la l'art, le développement de la méthode, les tests de performance et la rédaction de l'article. Le professeur Barka, deuxième auteur, a fourni la première idée original. Il a également participé à la recherche de pointe, au développement de la méthodologie ainsi qu'à la révision de l'article.

## **1.2 TITRE DU PREMIER ARTICLE**

**Optimization of laser welded ASTM A36 mild steel with different laser beam oscillation patterns utilizing experimental and simulation approach**

## **1.3 ABSTRACT**

Due to its increased use in oil refineries, power plants, the pharmaceutical industry and even in residences, laser welding of mild steel has recently gained a lot of interest in the industrial sector. In this paper, three types of laser beam oscillations (sinusoidal path, triangular path, and square path) were performed to weld ASTM A36 mild steel sheets of dimensions (125×60×1.8 mm) to investigate the effects of laser welding process parameters (laser power, welding speed) on the tensile strength of welds. Statistical tools such as ANOVA were used to generate mathematical models preceded by an experimental design using the Taguchi method. The results show that the optimal welded joint has good mechanical strength after laser welding. The optimal parameters for laser welding on ASTM A36 mild steel are described as follows: laser power of 1800 W, welding speed of 50 mm/s and triangular welding mode.

**Keywords:** Laser welding .ASTM A36 mild steel. Taguchi. Laser beam oscillations. ANOVA.

## **1.4 NOMENCLATURE**

**ANOVA**      Analysis of variance

<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>BM</b>	The base metal
<b><i>d</i></b>	Linear desirability
<b>HAZ</b>	Heat affected zone
<b>HV</b>	Hardness in Vickers
<b>P</b>	Laser power
<b>RSM:</b>	The response surface methodology
<b>v</b>	Speed
<b>UTS</b>	Ultimate tensile strength
<b>WM</b>	The welding metal

## **1.5 INTRODUCTION**

Due to the low heat input and high energy density (HAZ) of this method, laser welding produces fine-grained welds with a thermally constrained affected area [1, 2]. The HAZ grains may be refined as a result of recrystallization during the laser welding process [3]. With this high-power density welding method, aluminum alloys, steel, and dissimilar materials are now welded. Depending on the welding condition and process parameters, the joints formed by this welding method may contain defects, such as fractures generated in the narrow region of the weld, if certain conditions are met. The location and magnitude of these cracks influence both the weld's strength and the structure's durability. Fluid and heat flux in the weld bath are most affected by laser power, welding speed, defocusing distance, and shielding gas type during laser welding [4].

Mild steel has a lower tensile strength than austenitic steel due to its low carbon and alloying element content. Due to its low price and wide range of useful applications (including automobile body panels, food cans, metal chains, wire ropes, engine

components, bicycle rims, and nails and screws), it has replaced other types of steel as the industry standard. Cam *et al.* [5] welded with a CO<sub>2</sub> laser austenitic stainless steel 1.4404 (X2CrNiMo 18 10) and ferritic steel (grades St 37 and St 52) using filler wire. In the weld zone of dissimilar ferritic and ferritic-austenitic joints, the microstructure of welded C-Mn steels exhibited significant bainite/martensite proportions, resulting in an increase in hardness. Using helium as a shielding gas, Ancona *et al.* [6] performed laser beam butt welding at 2.5 kW on 3 mm thick specimens of 5083 aluminum-magnesium alloy. The effects of welding speed and laser power on the tensile properties, hardness profiles, and porosity of butt welds were investigated. At 2500 W laser power and 100 mm/s welding speed, the maximum tensile strength of the base metal was 90%. Mingsheng *et al.* [7] examined the metallurgical and mechanical properties of Si steel and Al-TRIP sheets welded with a Nuvonyx ISL-4000 diode laser. As a shielding gas, Argon at a rate of 30 l/min was utilized. The melt region of Si-alloyed steel contained martensite, whereas Al-alloyed steel had two morphology forms, including skeletal ferrite, bainitic ferrite, martensite, and retained austenite. Moreover, they report that Si-alloyed TRIP steel exhibited greater strength and ductility than Al-alloyed TRIP steel. Benyounis *et al.* [8] carried out 1.5 kW CO<sub>2</sub> laser welding on 3 mm thick cold-rolled AISI 304 steel sheets with a constant 5 L/min argon-based shielding gas flow. They found that a laser power range between 1.2 kW and 1.23 kW was optimal for producing high-quality joints. El-Batahgy *et al.* [9] performed laser welding on duplex stainless steel with a thickness of 6.40 mm to evaluate the effect of the process parameters on the melt area microstructure, mechanical properties, and resistance to corrosion of the welded seams. The researchers discovered that the transition from ferrite to austenite in the melt region of welded specimens is significantly influenced by the cooling rate, which is dependent on laser power and welding speed. Gao *et al.* [10] utilized a 5 kW CO<sub>2</sub> laser and a 350A conventional DCEP MIG welder to perform hybrid laser-MIG welding on 7 mm thick mild steel plates. Due to the interaction between the laser and arc, they observed a "wine-cup" shaped weld area. Compared to the arc region, the laser region possessed finer particle size, higher microhardness, lower element content in the fusion region, and a narrower HAZ. Bhadra *et al.* [11] have created a 3D computational model employing the finite element method to predict the transient thermal history, residual stresses, and residual strain induced by CO<sub>2</sub> laser welding in thin AISI 304 steel plates. This model

takes into consideration the geometry of the weld bead. They discovered that the maximum temperature, fusion area ("FZ"), and heat-affected region ("HAZ") increase with decreasing laser power and welding speed. Zhang *et al.* [12] welded stainless steel plates with a thickness of 12 mm using a 10 kW fiber laser with deep penetration. They observed a critical region of welding speed for full penetration welding of thick plates, with the focal point beneath the sample surface. Moreover, they discovered that the position of the focal point has a significant effect on the results of high-power fiber laser welding of thick plates.

From the aforementioned review of the literature, it can be concluded that there are relatively few publications on laser welding of A36 mild steel. Thin A36 mild steel sheets were laser-welded together using square, sinusoidal, and triangular beam oscillations in the current research. The influence of laser welding process parameters, such as laser power and constant distance welding speed, on the mechanical properties, was investigated.

## 1.6 EXPERIMENTAL PROCEDURES

### 1.6.1 Properties of ASTM A36 steel

The material used in this welding experiment is ASTM A36 mild steel. Two 1.8 mm thick base metal sheets of size 60mm×40mm were welded in butt seam configuration using Nd: YAG laser ( $\lambda = 1070$  nm) continuous mode with chemical composition and physical characteristics in **Table 1.1** and **Table 1.2**

**Table 1.1** Chemical composition of ASTM A36mild steel

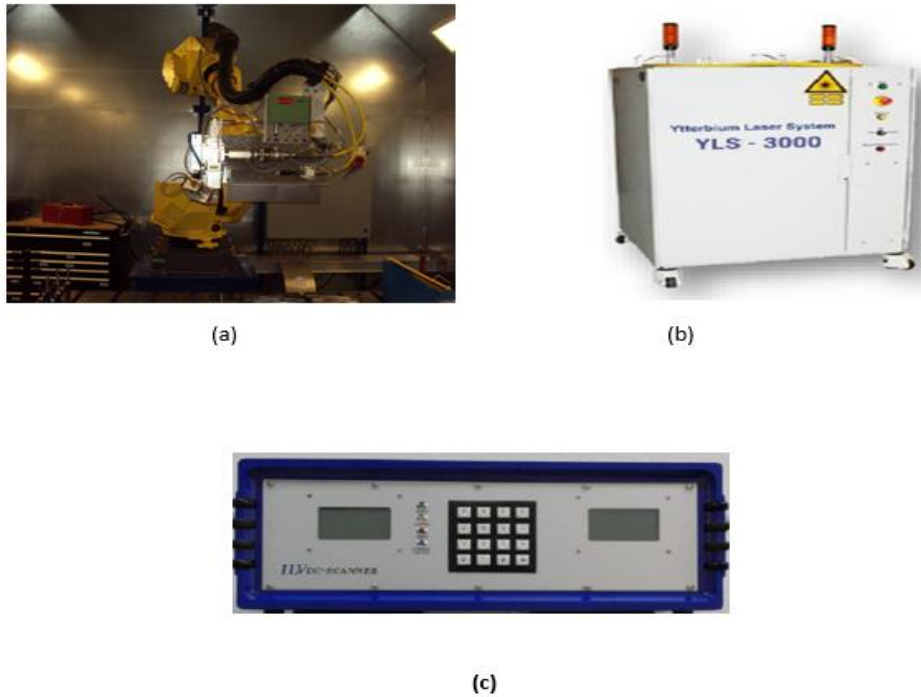
element	%
Fe	98.11
C	0.29
Mn	1.03
P	0.039
S	0.05
Si	0.28

**Table 1.2** Mechanical properties of ASTM A36 mild steel

<b>Tensile strength (MPa)</b>	<b>Yield strength (MPa)</b>	<b>Modulus of elasticity (GPa)</b>	<b>Elongation (%)</b>	<b>Hardness (HV)</b>
400–550	250–290	190–200	20–23	124–160

### 1.6.2 The laser welding system

The entire welding process was carried out using a fiber laser source (IPG YLS-3000 with maximum power of 3kW) and a galvanometric scanner (ILV DC-scan with maximum amplitude of 0.7mm to 15mm). a six-axis system (Fanuc® M-710ic) steers a light beam from a laser head powered by a 3000-watt class 4 solid state Nd: YAG laser emitting at 1070 nm. model IPG YLS-3000-ST2. The HIGHYAG BIMO laser head is equipped with variable zoom collimator and fixed focus lens. The combination provides circular focal spots ranging from 0.3 to 1.53 mm in diameter and a changeable welding speed. Two optical fibers of 200  $\mu\text{m}$  and 600  $\mu\text{m}$  diameter are also available, as shown in **Figure 1.1**.



**Figure 1.1** (a) Fanuc®M-710iC robot and HIGHYAG BIMO laser head (b) YLS-3000 laser source (c) ILV DC-scan

Two base metal sheets were welded together in a butt seam configuration using three beam oscillation types (sinusoidal path, triangular path and square path). Therefore, a DC scanner was used to pattern the three types of beam oscillation characterized by a constant amplitude of 1.5 mm and a constant frequency of 300 Hz. Several welds are performed by varying the laser power, the welding speed and the welding mode. Multiple welds are made by varying the laser power, welding speed and welding mode. Laser welding experiments were designed by Taguchi method using an L9 orthogonal array. This design was chosen based on the variation of key welding parameters, namely laser power, welding speed, and oscillation pattern between ASTM A36 mild steel sheets, as shown in **Table 1.3**, which varies between three levels. The L9 orthogonal array used for the laser welding tests is shown in **Table 1.4**.

**Table 1.3** Process parameter levels

Process Parameters	Symbol	Level 1	Level 2	Level 3
--------------------	--------	---------	---------	---------

Laser Power [W]	P	1800	2000	2200
Welding Speed [mm/s]	v	30	40	50
Oscillation Patterns	M	Sinusoidal	Triangular	Square

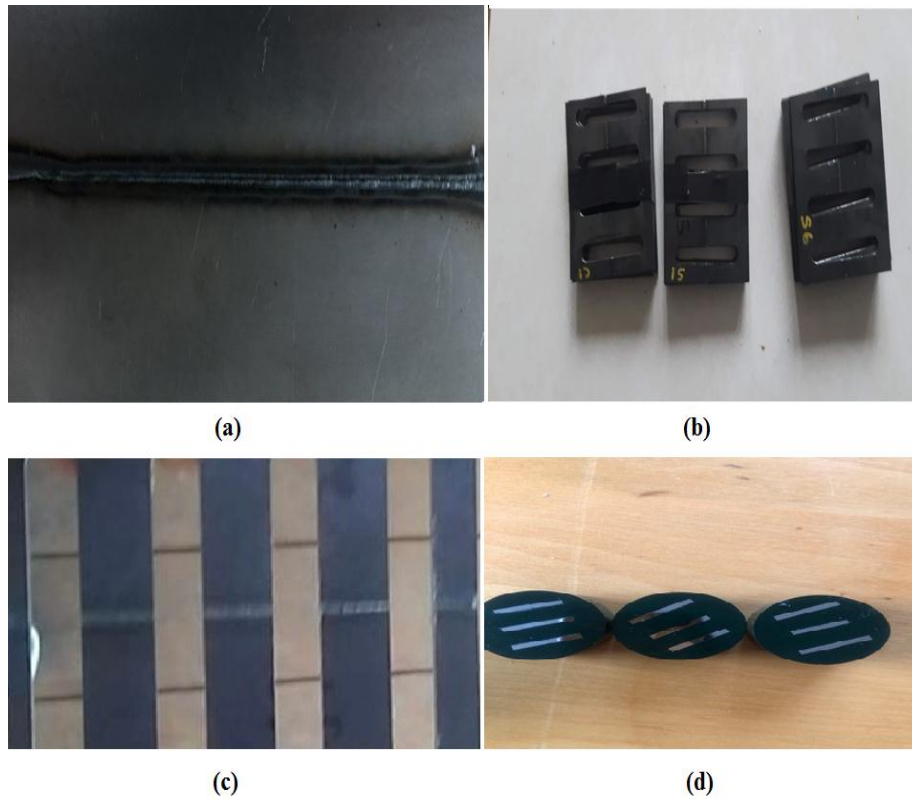
**Table 1.4** Parameters used for the Taguchi method

Test	Laser Power (W)	Welding Speed (mm/s)	Welding Pattern
1	1800	50	Square
2	1800	40	Sinusoidal
3	1800	30	Triangular
4	2000	30	Sinusoidal
5	2000	50	Triangular
6	2000	40	Square
7	2200	40	Triangular
8	2200	30	Square
9	2200	50	Sinusoidal

### 1.6.3 Sample preparation

The welded samples were machined by a CNC machine, and cut by a benchtop dual-purpose abrasive machine. Three parts were used to measure tensile strength, one part was made into polish-ready specimens using a multipurpose compression mounting press with a pressure of 4200 psi to measure microhardness as shown in **Figure 1.2**.

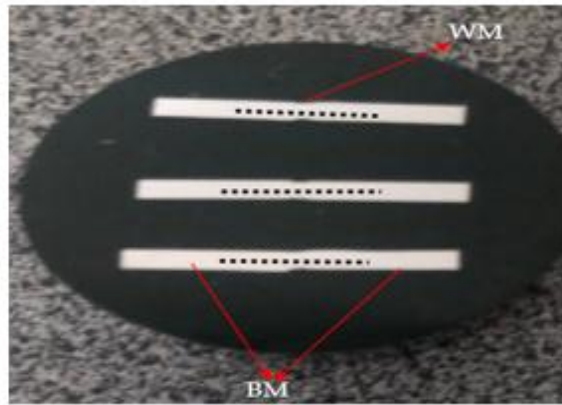




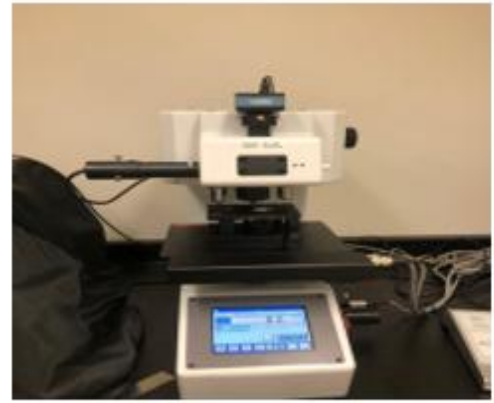
**Figure 1.2** The following figure shows: (a) the two ASTM A36 steel plates after welding. (b) the two plates after machining. (c) the plates after cutting (d) the plates after coating and polishing

#### 1.6.4 Micro-hardness analysis

The hardness measurements were made using the Vickers microhardness technique (ST-2000) **Figure 1.3** (b). The polished specimens were placed in the hardness tester for measuring the microhardness in the area along the mid-plane of the weld (perpendicular cross-section through the tool direction of welded steel alloy plates which was a measurement line 5 mm right and left of the weld center as shown in **Figure 1.3** (a). The load applied was 200 g for 10 s.



(a)



(b)

**Figure 1.3** The above figure shows (a) The line of hardness measurements (b) The Vickers microhardness tester (ST-2000)

### 1.6.5 Tensile test

Tensile testing is a standard method of evaluating the mechanical integrity of a material. Throughout the design process, tensile testing is frequently used to give fundamental strength data for materials as an acceptance test for material specifications. The main metrics that describe the strain-stress curve obtained in the tensile test are tensile strength (TSU). Yield strength ( $\sigma_y$ ), modulus of elasticity (E), percent elongation ( $\Delta L\%$ ) and area reduction (RA%) are all measures of plasticity. This method of testing can also be used to determine hardness, resilience, and Poisson's ratio ( $\nu$ ) [9]. In the following study, we performed ASTM E8 tensile tests on welded specimens at room temperature by using an MTS 810 testing machine and a test speed of 0.025 mm/min, as described in **Figure 1.4** (a) and (b).



(a)



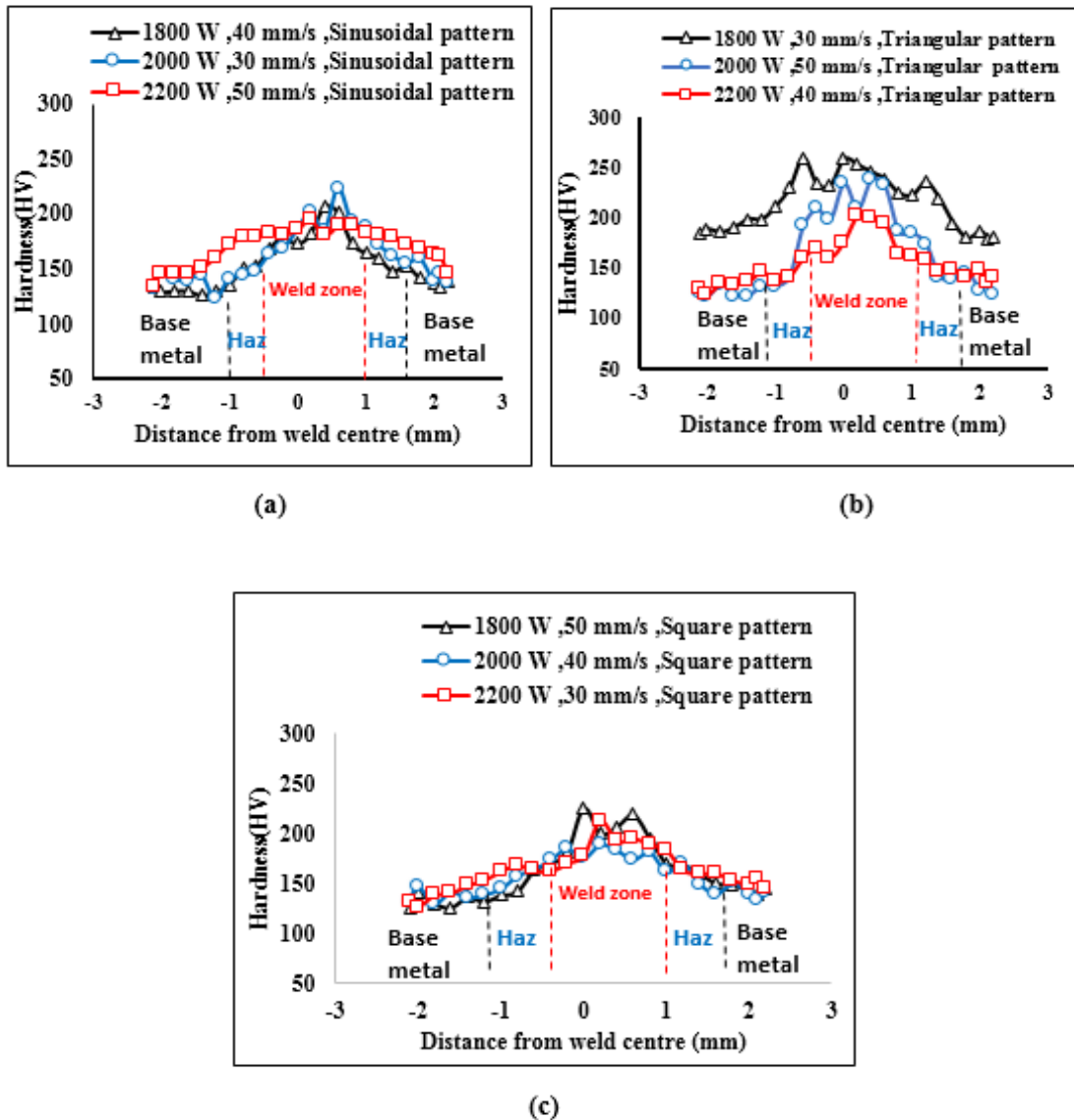
(b)

**Figure 1.4** Tensile test setup used for the experiments: (a) MTS 810 tensile machine. (b) specimen location during tensile testing

## 1.7 RESULTATS AND DISCUSSION

### 1.7.1 Hardness profile analysis

**Figure 1.5** illustrates the microhardness distribution in the laser welding area for laser welding by three types of beam oscillations (sinusoidal, triangular and square) with the laser welding parameters (laser power and welding speed). For ASTM A36 steel, the hardness of the parent metal is approximately 124 HV. The average micro-hardness of the fusion area of the triangular pattern weld which is shown in **Figure 1.5** (b) is about 260 HV for the welding parameters;  $P = 1800 \text{ W}$ ,  $v = 30 \text{ mm/s}$ . In addition, the same sample depicts an average value of about 239 HV in the weld zone with the welding parameters namely,  $P = 2000 \text{ W}$ ,  $v = 50 \text{ mm/s}$  as seen in **Figure 1.5** (b). Furthermore, it can also be also seen in **Figure 1.5** (b) that for the welding parameters;  $P = 2200 \text{ W}$ ,  $v = 40 \text{ mm/s}$ , the weld zone depicts an average of about 202 HV. A similar trend can be observed for the sinusoidal and square patterns as shown in **Figure 1.5** (a) and (c). In comparison, the average microhardness values of triangular pattern waves are higher for all the varying parameters as compared to sinusoidal and square patterns.

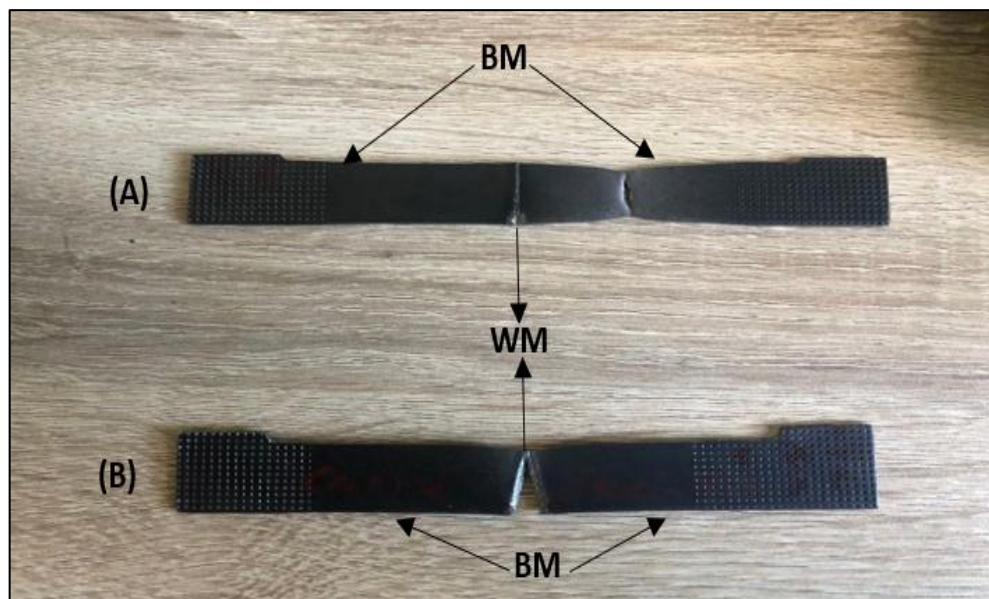


**Figure 1.5** The micro-hardness distributions for all the welded samples with different parameters for ASTM A36 mild steel: (a) Cross-section view of the welded joints indication of various zones (b) Square pattern (c) Triangular pattern (d) Sinusoidal pattern

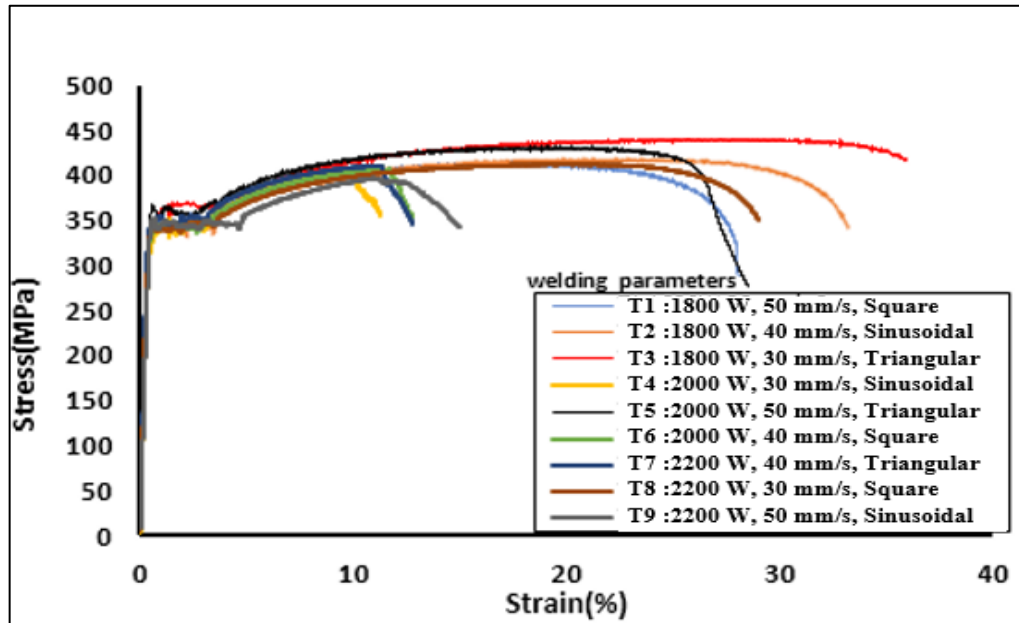
### 1.7.2 Analysis of tensile properties

Transverse tensile properties, such as the ultimate tensile strength (UTS), were evaluated for each of the weld tests according to Taguchi's L9 experimental design. The results obtained, which are the average of three measurements, are more reliable because three specimens were prepared and examined for each experimental run. The maximum stress-

strain curves for all the testing in this investigation are displayed in **Figure 1.7**. As can be seen in **Figure 1.7**, the elastic regions of the curves are not always of the same height, suggesting that the Young's modulus is affected by the experiments. The results found are between 395,30 and 433,40 MPa as shown in **Table 1.5**. Experiment cycle 9's parametric combination yields a weak tensile strength of 395.30MPa. In contrast, a maximum tensile strength of 433.40 MPa is obtained from the parameter combination of the third experimental run. The low tensile strength of test 9 can be attributed to the extent of defects created during welding. The tensile samples' fracture trajectories show that the metal broke away from the melt zone and the heat-impacted zone, deep in the base metal. In a few cases, however, underfill and other faults likely caused the fracture to occur along the melt line. The fracture trajectory of the tensile samples after fracture shows that the fracture occurred mainly in the parent metal away from the melting region and the heat-affected area, but for a few samples, the fracture occurred in the melt line. probably due to defects such as underfill as seen in **Figure 1.6** (A) and (B).



**Figure 1.6** A top view of two fractured samples from the butt joint tensile tests for ASTM A36 mild steel



**Figure 1.7** Tensile test results Strain-strain curve of ASTM A36 mild steel

**Table 1.5** Taguchi orthogonal L9 Design of experiment with tensile test results for ASTM A36 mild steel

S. No.	Laser Power (W)	Welding Speed (mm/s)	Pattern Type	Ultimate Tensile Strength (MPa)
1	1800	50	Square	412.02
2	1800	40	Sinusoidal	419.26
3	1800	30	Triangular	433.40
4	2000	30	Sinusoidal	405.13
5	2000	50	Triangular	430.02
6	2000	40	Square	409.37
7	2200	40	Triangular	411.54
8	2200	30	Square	409.95
9	2200	50	Sinusoidal	395.30

### 1.7.3 ANOVA analysis and development of the response surface (RS) regression model

#### 1.7.3.1 Analysis of variance

The response surface model was created after analysis of variance (ANOVA) revealed most influential input parameters and their interaction with the desired outcome. For this

ANOVA study, we used the stepwise regression technique to get rid of terms that were not statistically significant. In this technical procedure, the probability value for each term in the analytic model is compared to a predetermined fisher ratio. If the p-value (significant probability value) for an ANOVA term is less than the confidence level, then that term can be considered significant [9]. The developed model was given a 95% confidence level in this research. Since the terms were found to significantly affect the empirical relationships, "p-values" below 0.05 indicate significance. presents the results of a one-way analysis of variance (ANOVA) test performed on the UTS (tensile strength). The ANOVA tables detail the effective and significant input parameters for each response. R2 is used to verify the fit between the predicted and the measured data for all output responses, the R2 value was near 100%, showing the high correlation between the experimental and predicted results. The factors of welding by pattern and laser power have the greatest contribution worth 49.78% and 33.62% then the welding speed with less contribution equal to 1.82%. In a second step, we analyzed the two-way interaction effects, we note that the (v \*M) interaction has an average contribution equal to 14.59%.

**Table 1.6** ANOVA table for ultimate tensile strength for ASTM A36 mild steel

<b>Variable</b>	<b>DDL</b>	<b>Square sum</b>	<b>Contribution (%)</b>	<b>Medium Square</b>	<b>F- Value</b>	<b>P- Value</b>
Laser Power	1	382.24	33.62	512.605	474.48	0.002
Welding speed	1	20.68	1.82	20.683	19.15	0.048
Oscillation Pattern	2	565.91	49.78	64.349	59.56	0.017
Two-factor interaction: v *M	1	165.85	14.59	82.925	76.76	0.013
Error	2	2.16	0.19	1.08		
Total	8	1136.85	100			
S	R-sq	R-sq(adj)		PRESS		R- sq(pred)
1.03940	99.81%	99.24%		46.2553		95.93%

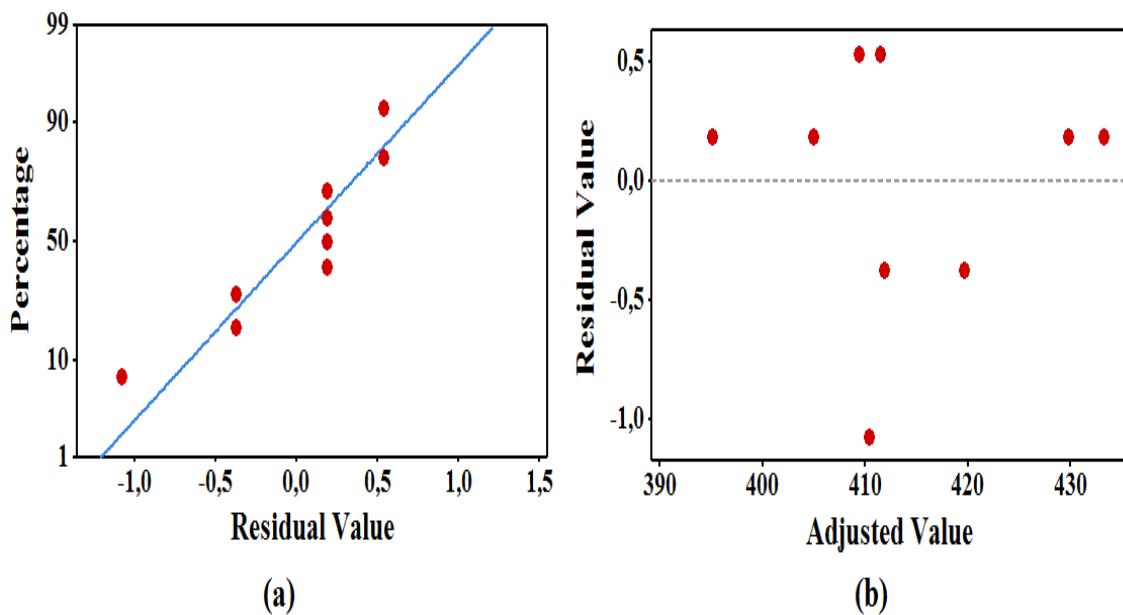
The final mathematical model determined by the above analysis is shown below in the following form:

$$\text{Square Pattern: } \text{UTS (MPa)} = 589.31 - 0.06536 P - 1.2037 v \quad (1)$$

$$\text{Sinusoidal Pattern: } \text{UTS (MPa)} = 530.80 - 0.06536 P + 0.1621 v \quad (2)$$

$$\text{Triangular Pattern: } \text{UTS (MPa)} = 536.32 - 0.06536 P + 0.4846 v \quad (3)$$

As a diagnostic tool, the normal probability plot of the studentized residuals was crucial to illustrate, see **Figure 1.8**. The residual plot looks like it's heading toward a straight line, so we know the normality assumption was met.



**Figure 1.8** Residual plots for UTS Response of ASTM A36 mild steel (a) Normal probability plot (b) normal probability residual as a function of the fitted value

### 1.7.3.2 Variation of the developed model

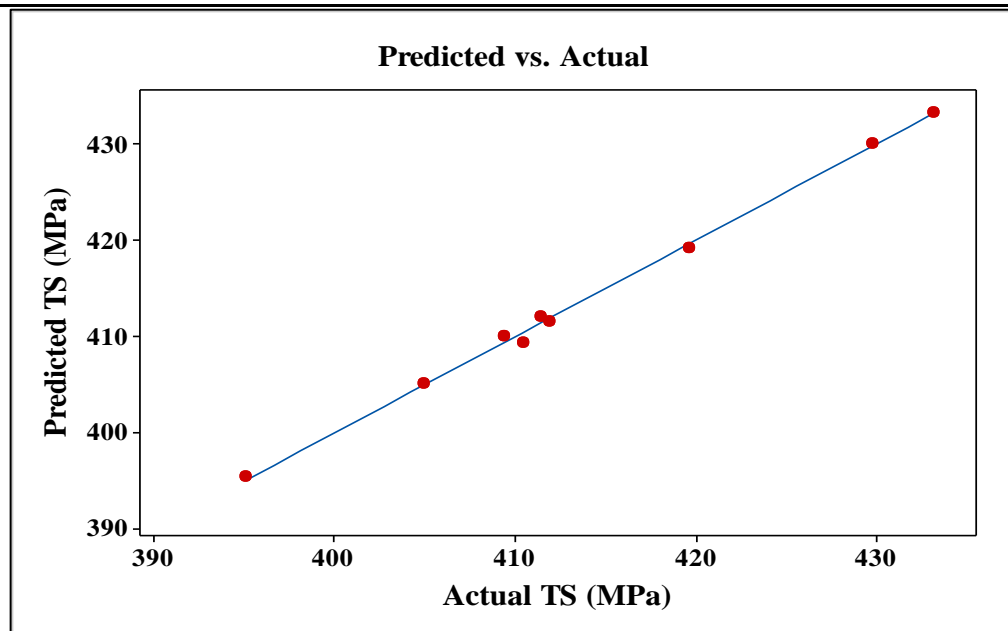
To apply this model to predict and monitor welding results, it is necessary first to validate their fitting model. The predicted values of the experimental runs were calculated and compared with their actual values, as seen in **Table 1.7**. In addition, the error percentages in the prediction are in close accordance with experimental results, demonstrating the accuracy of the developed models. The validation curve of the model fit is presented in



**Figure 1.9** respectively. According to the curve, the actual values are distributed along the diagonal line and close to the curve of the predicted values in most cases indicating that the data fit is good.

**Table 1.7** Variation of test results for ASTM A36 mild steel

S. No.	Laser Power (W)	Welding Speed (mm/s)	Pattern Type	Ultimate Tensile strength value (MPa)		Error (%)
				Experimental	Model predicted	
				1	1800	
2	1800	40	Sinusoidal	419.26	419.64	0.09
3	1800	30	Triangular	433.4	433.21	0.04
4	2000	30	Sinusoidal	405.13	404.94	0.05
5	2000	50	Triangular	430.02	429.83	0.04
6	2000	40	Square	409.37	410.44	0.26
7	2200	40	Triangular	411.54	411.91	0.09
8	2200	30	Square	409.95	409.41	0.13
9	2200	50	Sinusoidal	395.3	395.11	0.05

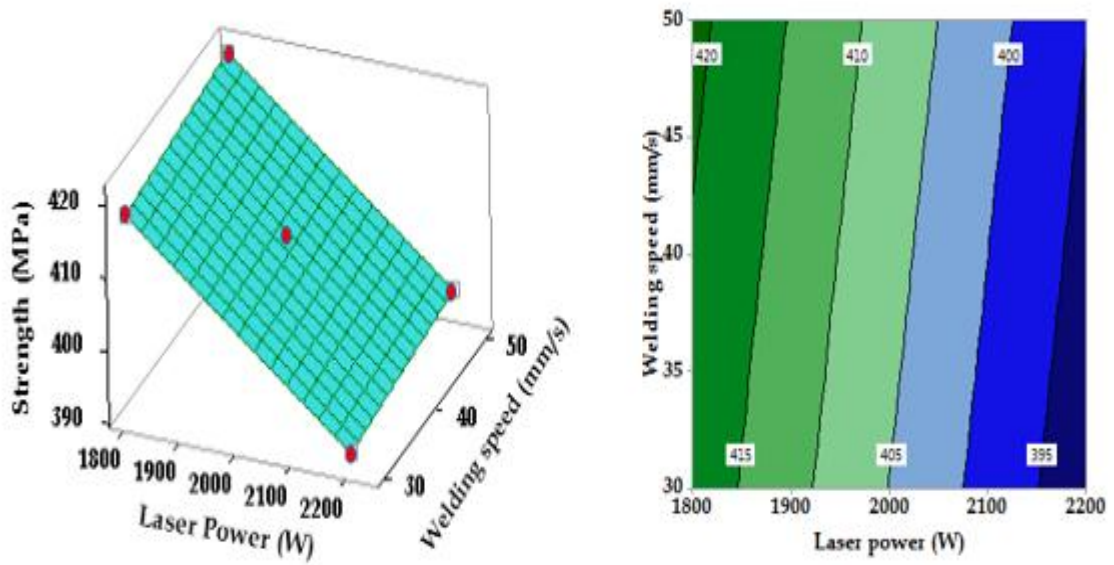


**Figure 1.9** Validation of the model fit for ASTM A36 mild steel

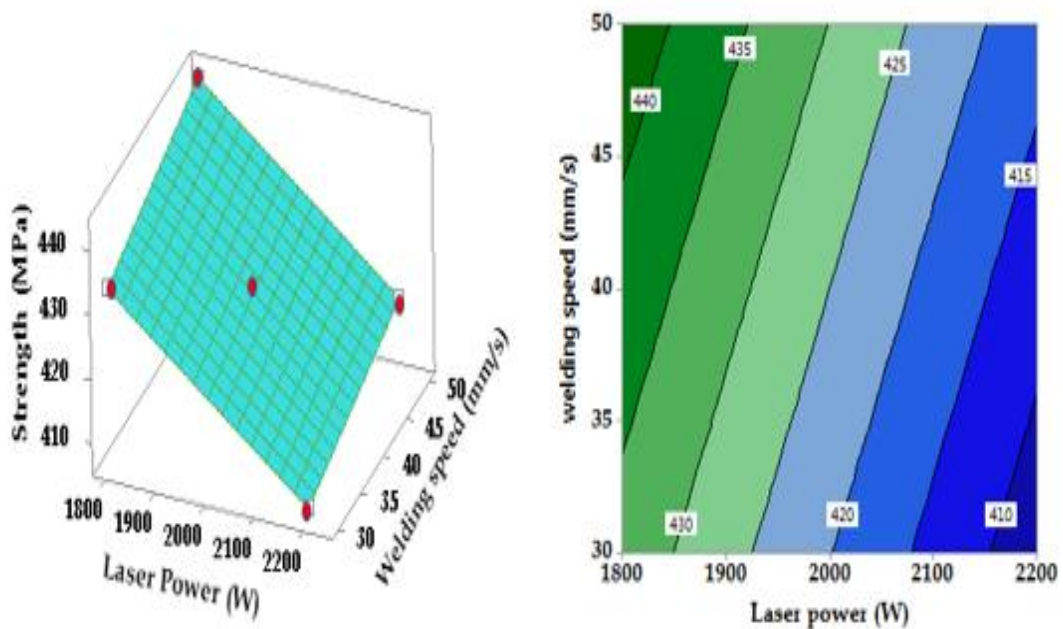
## 1.7.4 Effect and optimization of process parameters on tensile strength (UTS)

### 1.7.4.1 Interaction effects and surface plots

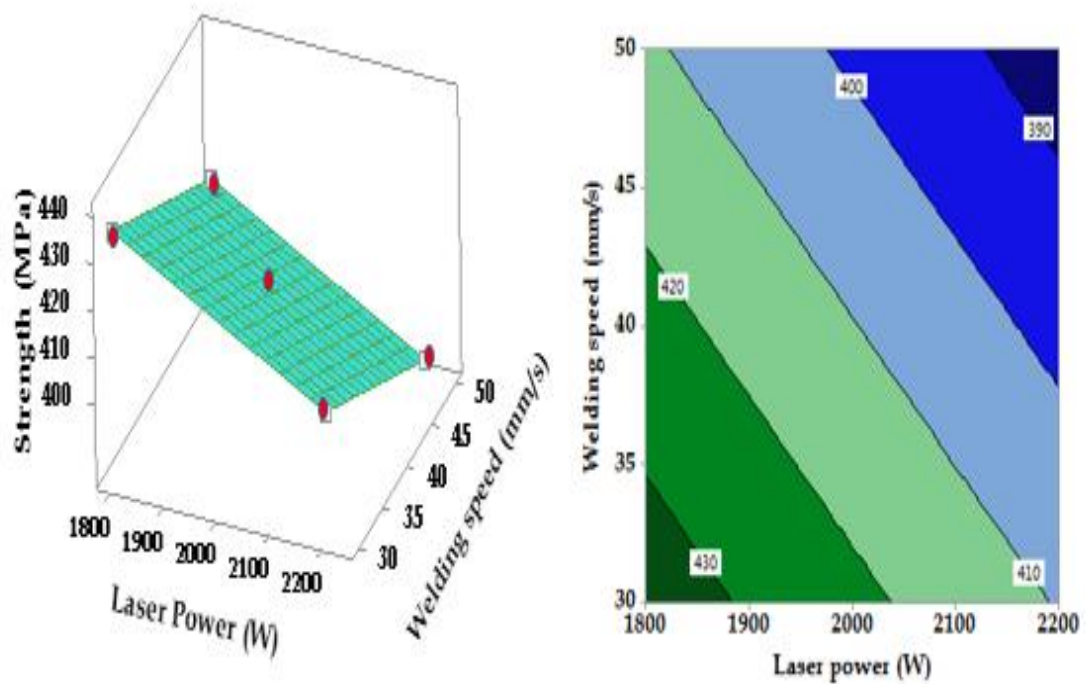
Three-dimensional (3D) plots of the contour and surface of the weld strength versus process factors during welding with three different kinds of laser beam oscillations are illustrated in **Figure 1.10**, **Figure 1.11** and **Figure 1.12**. Weld strength is low when high laser power and a low welding speed are used when welding with a sinusoidally oscillating laser beam, as shown in **Figure 1.10** (a) and (b). When the laser power is reduced and the welding speed is slowed, more heat is introduced per unit length of joint, which increases the joint strength due to increased melting and mixing at the joint. The optimal weld strength can be obtained by selecting a suitable combination of welding speed (45-50 mm/s) and laser power (1800 W). In **Figure 1.11** (a) and (b), the tensile strength of a laser beam weld varies with laser power and welding speed during triangle oscillation welding. It was observed that tensile strength increases with welding speed and decreases with laser power. By adjusting the welding speed (35-50 mm/s) and the laser power, the ideal welding resistance can be achieved. **Figure 1.12** (a) and (b) illustrates the impact of laser power and welding speed, respectively, on weld strength during square oscillation welding with a laser beam. The high weld tensile strength is observed at low welding speeds and low laser powers. Increasing both laser power and welding speed weakens the weld's ability to resist tension. To maximize weld strength, an appropriate mix of welding speed and laser power may be selected at any given time. The laser power and welding speed can be selected at 1800-1900 W and 30-35 mm/s, respectively.



**Figure 1.10** Sinusoidal pattern (a) Contours plots (b) Response surface diagram showing the effect of laser power and welding speed on the sinusoidal pattern weldment's tensile behavior ASTM A36 mild steel.



**Figure 1.11** Triangular pattern (a) Contours plots (b) Response surface diagram showing the effect of laser power and welding speed on the triangular pattern weldment's tensile behavior ASTM A36 mild steel.



**Figure 1.12** Square pattern (a) Contours plots (b) Response surface diagram showing the effect of laser power and welding speed on the square pattern weldment's tensile behavior for ASTM A36 mild steel.

The main effects plot shows a significant impact of laser power and Oscillation Pattern on UTS (tensile strength). Indeed, we observe in **Figure 1.13** that decreasing the laser power during triangular oscillation welding causes a significantly increase in UTS tensile strength and welding speed causes only a slight decrease in the UTS tensile strength value. **Figure 1.14** shows an interactive graph for the ultimate tensile strength. It can be concluded that the optimal setting for laser power, welding speed and Oscillation Pattern are 1800 W, 30 mm/s and a triangular oscillation of the laser beam respectively.

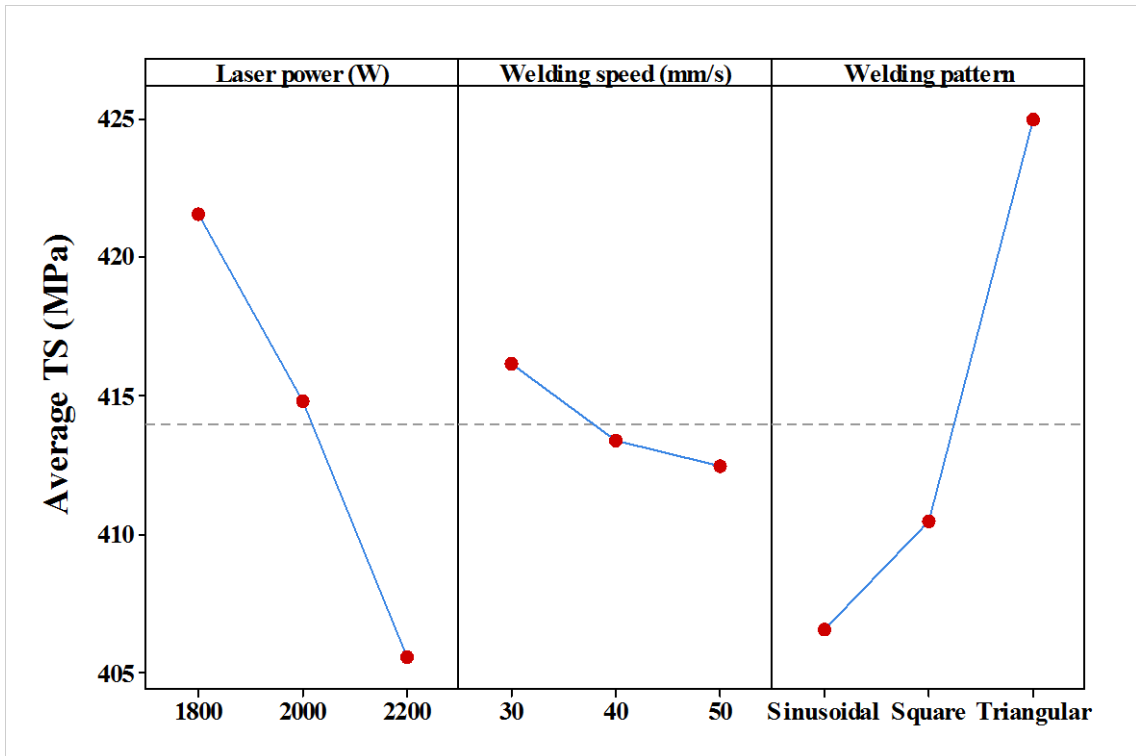


Figure 1.13 Main effect curve of process parameters on tensile strength ASTM A36 mild steel

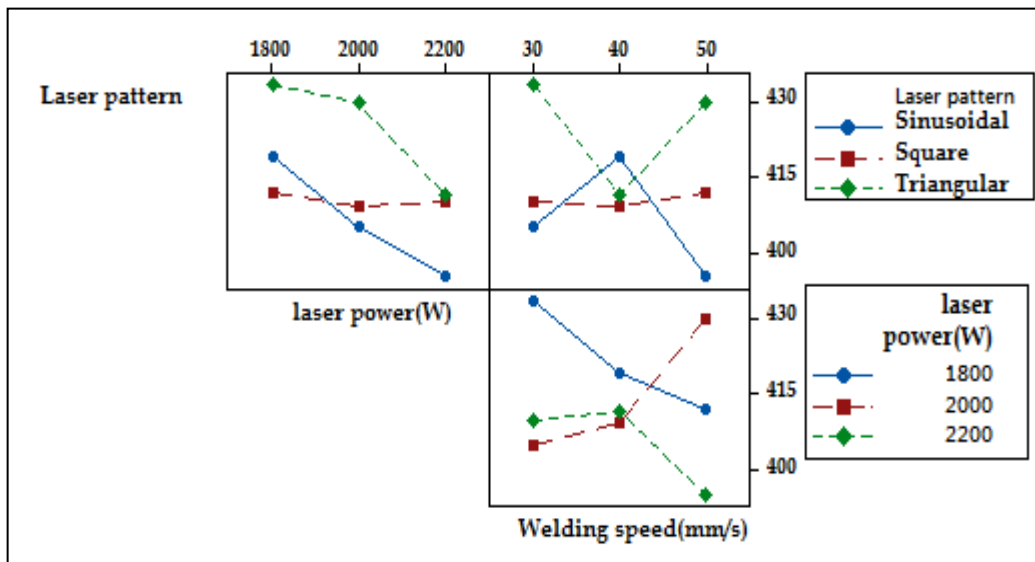
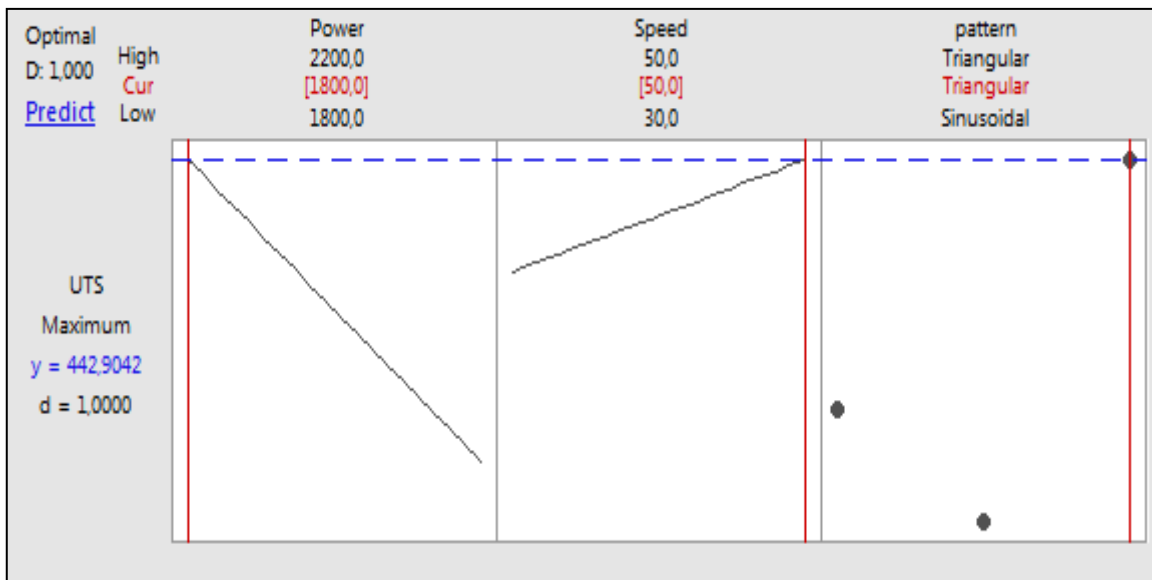


Figure 1.14 Interaction graph of the input process parameters ASTM A36 mild steel

### 1.7.4.2 Optimization and confirmation of process parameters

Desirability functions, a function for determining the ideal response quality, have been used in RSM-based optimization procedures. The benefits of the desirability method include its ease of use, adaptability, and the ability to assign weight to each response [10]. By employing the desirability approach to process optimization, the inherent nature of the response characteristics is reduced to a one-dimensional factor called the desirability factor. The factor is in the range of 0 to 1. In this part, we will try to zero in on the optimal settings for laser welding. The laser welding parameters were refined using a desirability approach. The Minitab program estimates the predicted values using a desirability parameter ( $d$ ) with values ranging from 0 to 1 (with perfect values when  $d = 1$ ) to acceptable values when  $d > 0.7$ . Our objective was to increase the UTS value to its fullest potential. The results of the optimization are shown in **Figure 1.15**. The optimal welding conditions determined are the following: laser power interaction of 1800W, welding speed interaction of 50 mm/s and triangular oscillation of the laser beam. The expected response for the optimal combination is UTS=442.90 MPa with desirability of 1.



**Figure 1.15** UTS response optimization diagram ASTM A36 mild steel

## 1.8 CONCLUSION

Laser welding was performed on ASTM A36 mild steel materials using three types of laser beam oscillations. Tensile properties and microhardness measurements were tested on the welded samples. The microhardness of all samples was highest at the weld region and gradually decreased towards the parent metal. The samples welded using triangular oscillation had the highest microhardness values compared to those welded by sinusoidal and square oscillation. The tensile strength was also highest during triangular oscillation welding compared to sinusoidal and square oscillation welding. The optimum tensile strength for sine wave laser welding was achieved by combining a laser power of 1800 W with a welding speed of 45-50 mm/s. The optimum tensile strength for triangular oscillation laser beam welding was achieved by using a combination of 1800 W laser power and a welding speed of 35-50 mm/s. The optimal parameters for welding by the square oscillation of the laser beam were a combination of 1800-1900 W for the laser power and 30-35 mm/s for the welding speed. A decrease in laser power during laser welding by the three types of oscillations resulted in a considerable increase in the ultimate tensile strength (UTS). The best combination of welding parameters was determined to be a laser power of 1800 W, a welding speed of 30 mm/s, and a triangular welding mode.

## 1.9 REFERENCE

- [1] L. S. Derevyagina, A. I. Gordienko, Orishich, A. G. Malikov, N. S. Surikova, and M. N. Volochnaev, "Microstructure of intercritical heat affected zone and toughness of microalloyed steel laser welds," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 770, pp. 138522, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.MSEA.2019.138522.
- [2] R. Cao et al., "Effects of boron on the microstructure and impact toughness of weathering steel weld metals and existing form of boron," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 833, pp. 142560, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MSEA.2021.142560.
- [3] P. Kumar and A. N. Sinha, "Microstructure and mechanical properties of pulsed Nd:YAG laser welding of st37 carbon steel," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 133, pp. 733-739, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.PROCS.2018.07.125.
- [4] P. Pankaj, A. Tiwari, R. Bhadra, and P. Biswas, "Experimental investigation on CO2 laser butt welding of AISI 304 stainless steel and mild steel thin sheets," *Opt. Laser Technol.*, vol. 119, no. November 2018, pp. 105633, 2019, doi: 10.1016/j.optlastec.2019.105633.

- [5] G. Çam, Ç. Yeni, S. Erim, V. Ventzke, and M. Koçak, "Investigation into properties of laser welded similar and dissimilar steel joints," *Sci. Technol. Weld. Joining*, vol. 3, no. 4, pp. 177-189, 2013, doi: 10.1179/STW.1998.3.4.177.
- [6] A. Ancona, P. M. Lugarà, D. Sorgente, and L. Tricarico, "Mechanical characterization of CO2 laser beam butt welds of AA5083," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 191, no. 1-3, pp. 381-384, Aug. 2007, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2007.03.048.
- [7] M. Xia, Z. Tian, L. Zhao, and Y. N. Zhou, "Metallurgical and Mechanical Properties of Fusion Zones of TRIP Steels in Laser Welding," *ISIJ Int.*, vol. 48, no. 4, pp. 483-488, Apr. 2008, doi: 10.2355/ISIJINTERNATIONAL.48.483.
- [8] K. Y. Benyounis, A. G. Olabi, and M. S. J. Hashmi, "Multi-response optimization of CO2 laser-welding process of austenitic stainless steel," *Opt. Laser Technol.*, vol. 40, no. 1, pp. 76-87, Feb. 2008, doi: 10.1016/J.OPTLASTEC.2007.03.009..
- [9] A.-M. El-Batahgy, A.-F. Khourshid, and T. Sharef, "Effect of Laser Beam Welding Parameters on Microstructure and Properties of Duplex Stainless Steel," *Materials Science and Applications*, vol. 02, no. 10, pp. 1443-1451, Oct. 2011, doi: 10.4236/MSA.2011.210195.
- [10] M. Gao, X. Zeng, J. Yan, and Q. Hu, "Microstructure Characteristics of Laser-MIG Hybrid Welded Mild Steel," *Applied Surface Science*, vol. 254, no. 18, pp. 5715-5721, Jul. 2008, doi: 10.1016/J.APSUSC.2008.03.070.
- [11] R. Bhadra, P. Pankaj, P. Biswas, and U. S. Dixit, "Thermo-Mechanical Analysis of CO2 Laser Butt Welding on AISI 304 Steel Thin Plates," *International Journal of Steel Structures*, vol. 19, no. 1, pp. 14-27, 2019, doi: 10.1007/s13296-018-0085-z.
- [12] M. Zhang, G. Chen, Y. Zhou, and S. Liao, "Optimization of Deep Penetration Laser Welding of Thick Stainless Steel with a 10 kW Fiber Laser," *Materials and Design*, vol. 53, pp. 568-576, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.MATDES.2013.06.066.



## CHAPITRE 2

### **Optimisation de la résistance mécanique des soudures oscillées par faisceau laser d'un alliage d'acier galvanisé A653 à l'aide de données expérimentales et de la méthodologie de la surface de réponse**

Said Ouamer <sup>1</sup>, Nouredine Barka <sup>1</sup>, Asim Iltaf <sup>2</sup>, Karim Bensalem <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mathematics, Computer Science and Engineering, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, Canada

*Cet article a été soumis dans Designs (MDPI) portant le numéro de référence JMPEP-23-2283*

#### **2.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE**

Cette étude examine la résistance à la traction de soudures réalisées à partir d'acier galvanisé A653 en utilisant des facteurs de soudage au laser tels que la puissance du laser et la vitesse de soudage, tout en employant trois types d'oscillations du faisceau (sinusoïdales, triangulaires et carrées). Dans cette étude, l'effet des paramètres de soudage laser est évalué pour trois types de joints à oscillation du faisceau laser en utilisant la méthode Taguchi pour définir un plan expérimental L9. Une résistance mécanique accrue peut être obtenue en ajustant la puissance du laser, la vitesse de soudage et le mode d'oscillation. Les données des tests de traction sont analysées par ANOVA et régression pour créer des modèles mathématiques. L'optimisation selon la méthode de réponse en surface, en utilisant trois paramètres (oscillation du faisceau laser, puissance du laser et vitesse de soudage), a montré qu'un joint de plus grande résistance mécanique peut être obtenu en utilisant une oscillation sinusoïdale du faisceau laser avec une puissance de 2200 W et une vitesse de soudage de 30 mm/s.

**Mots clés :** Soudage au laser, acier galvanisé A653, oscillation du faisceau, résistance à la traction, ANOVA.

Ce deuxième article est intitulé « *Optimization of mechanical strength of laser beam oscillated weldments of A653 galvanized steel alloy using experimental data and response surface methodology* » a été rendu possible grâce à la collaboration de l'équipe de recherche du professeur Noureddine Barka. Il a été soumis pour publication dans sa version finale en 2022 par le *Designs (MDPI)*. La majeure partie de la rédaction a été effectuée par moi-même comme le premier auteur sous la supervision de Noureddine Barka qui est également l'instigateur du projet de recherche en soulevant la problématique et en suggérant la méthodologie adéquate.

## **2.2 TITRE DU DEUXIÈME ARTICLE**

**Optimization of mechanical strength of laser beam oscillated weldments of A653 galvanized steel alloy using experimental data and response surface methodology**

## **2.3 ABSTRACT**

This study examines the tensile strength of welds made from A653 galvanized steel using laser welding factors such as laser power and welding speed, while employing three types of beam oscillations (sinusoidal, triangular and square). In this study, the effect of laser welding parameters is evaluated for three types of laser beam oscillation joints using the Taguchi method to define an experimental design L9. Increased mechanical strength can be achieved by adjusting the laser power, welding speed and oscillation mode. Tensile test data are analyzed by ANOVA and regression to create mathematical models. Optimization according to the surface response method, using three parameters (laser beam oscillation, laser power and welding speed), showed that a joint with higher mechanical strength can be obtained using sinusoidal laser beam oscillation with a power of 2200 W and a welding speed of 30 mm/s.

**Keywords:** Laser welding, A653 Galvanized steel, beam oscillation, Tensile strength, ANOVA.

## **2.4 NOMENCLATURE**

**ANOVA**      Analysis of variance

**ASTM**      American Society for Testing and Materials

<b>BM</b>	The base metal
<i>d</i>	Linear desirability
<b>HAZ</b>	Heat affected zone
<b>HV</b>	Hardness in Vickers
<b>M</b>	Welding pattern
<b>P</b>	Laser power
<b>RSM</b>	The response surface methodology
<b>v</b>	Speed
<b>UTS</b>	Ultimate tensile strength
<b>WM</b>	The welding metal

## 2.5 INTRODUCTION

The steadily increasing use of corrosion-resistant materials (such as aluminum or zinc-coated steel) and the reduction of vehicle weight (via the use of lightweight materials or the optimization of the thickness of sheet metal throughout the body) are two of the most significant changes in the automotive industry [1,2]. Thin sheets of galvanized carbon steel offer advantages in rigidity and other areas [3], despite aluminum's lighter weight and lower cost. Consequently, galvanized thin-gauge steels may soon gain favor in automotive applications [3]. Resistance spot welding is currently the preferred method for automotive body assembly; however, this method presents difficulties when welding light-gauge galvanized steels due to the limited electrode life. Laser welding has many benefits, including a quick processing time, a small heat-affected region, high-quality welds, a low heat output per unit volume, a fiber optic beam, and easy robot interfacing [4]. However, laser-welded auto parts may have more reliable mechanical properties and greater repeatability than resistance spot-welded auto parts. For this reason, laser welding

is a viable option for assembling automotive components made of galvanized steel with a thin gauge.

Due to the zinc coatings and thin gauge of thin-gauge galvanized steel, it is still challenging to produce sound welds using laser welding in automotive applications. Due to the low boiling point of zinc in comparison to the melting point of steel, the presence of vaporized zinc between steel sheets frequently causes the weld metal to be expelled or the weld to become very porous [5]. In addition, the workpiece's thickness has a substantial impact on the stability of the keyhole. Low-thickness keyholes cannot be held steady during welding due to insufficient vaporization of metal [3]. A decrease in the stability of the keyhole can easily result in issues such as the blocking of the keyhole formation or the transition to a molten state [3]. Care in selecting the proper output power, welding speed, focal position, shielding gas, and position accuracy is directly proportional to the quality of the weld [6]. Although it has been suggested that a narrow gap between sheets can significantly reduce the impact of highly pressurized zinc vapor, the impact and the moderate gap range recommended for fiber laser welding of thin gauge galvanized steel are still unclear [5,7]. Additionally, Ma *et al.* [8] presented a double-pass laser beam technique in which the first unfocused laser is used to remove zinc coatings at the interface and the second focused laser is used for welding. According to Chen *et al.* [9], spattering is caused by the erratic escape of zinc vapor; therefore, they improved the process by mounting a vacuum device over the keyhole. Zhang *et al.* [10] examined the effectiveness of welding with extra copper powder. The addition of copper assisted in the formation of a zinc-copper strong solution in the weld, which inhibited the zinc-induced plasma and decreased plasma oscillation.

Although the aforementioned experimental improvements are effective at reducing splash, they cannot be implemented in production because they are more costly and involve more steps. To study the transport phenomena at the spatter's origin in order to comprehend the physics of welding, digital models were created. Hao *et al.* [11] developed a computer model for the partial penetration laser welding of galvanized steels in order to examine the effect of welding factors on the zinc vapor forces in the melt. Reducing the heat supply reduced the forces exerted by the zinc vapor, thereby decreasing splashing. Wan *et al.* [12] measured and analyzed the size and shape of keyholes. The

authors identified two types of spatters, one for high-line energies and another for low-line energies. They discovered that a medium heat input led to more efficient welding with less spatter.

In comparison to conventional straight-line welding, oscillating laser welding creates a stable keyhole, which increases welding stability and eliminates defects such as pores and spatters [13]. Li *et al.* [14] discovered that when laser welding steel sheets, a circular oscillating path provided greater penetration than longitudinal and transverse oscillating paths. Chen *et al.* [15] created a three-dimensional thermofluid model to examine the heat transfer and flow of the melt during oscillating laser welding. In comparison to non-oscillating welding, circular oscillating welding reduced the temperature peak and temperature gradient. Liu *et al.* [16] utilized high-speed photography to observe the top surface flow behavior of the melt when laser welding with sinusoidal oscillations was employed. The researchers discovered that beam oscillation improved melt flow and that an oscillating laser widened the keyhole, allowing more metal vapor to escape. In accordance with these evaluations, the oscillating laser improves welding consistency by influencing melt flow behavior and melt morphology, thereby reducing the number of defects. However, few studies have explored how laser oscillation influences the mechanical properties of galvanized steel during welding.

In this study, galvanized steel alloy sheets were welded using sinusoidal, triangular, and square laser beam oscillations with varying parameters. We examined the individual and combined effects of laser power, welding speed, and Oscillation Pattern on the tensile strength of seams produced under various operating conditions (oscillation patterns). Additionally, a comparison between the three types of welds was conducted.

## **2.6 MATERIALS AND METHODS**

### **2.6.1 Materials**

#### **2.6.1.1 Properties of ASTM A653 galvanized steel**

In this investigation, ASTM A653 galvanized steel alloy sheets of 1.8 mm x 125 mm x 50 mm dimensions, provided by CBR laser Inc (Princeville, Quebec), were used as a base alloy for the experiments. The chemical composition as measured by energy

dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and mechanical properties of the galvanized steel is shown in **Table 2.1 and Table 2.1**, respectively. Every two sheets of the base alloy were welded in butt joint configuration using a continuous mode of Nd: YAG laser ( $\lambda = 1070$  nm).

**Table 2.1** Chemical composition of galvanized steel as measured by EDS of of A653 galvanized steel

<b>Elements</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Al</b>
ASTM A653 Galvanized steel	0.03	0.25	0.007	0.015	0.025	0.073

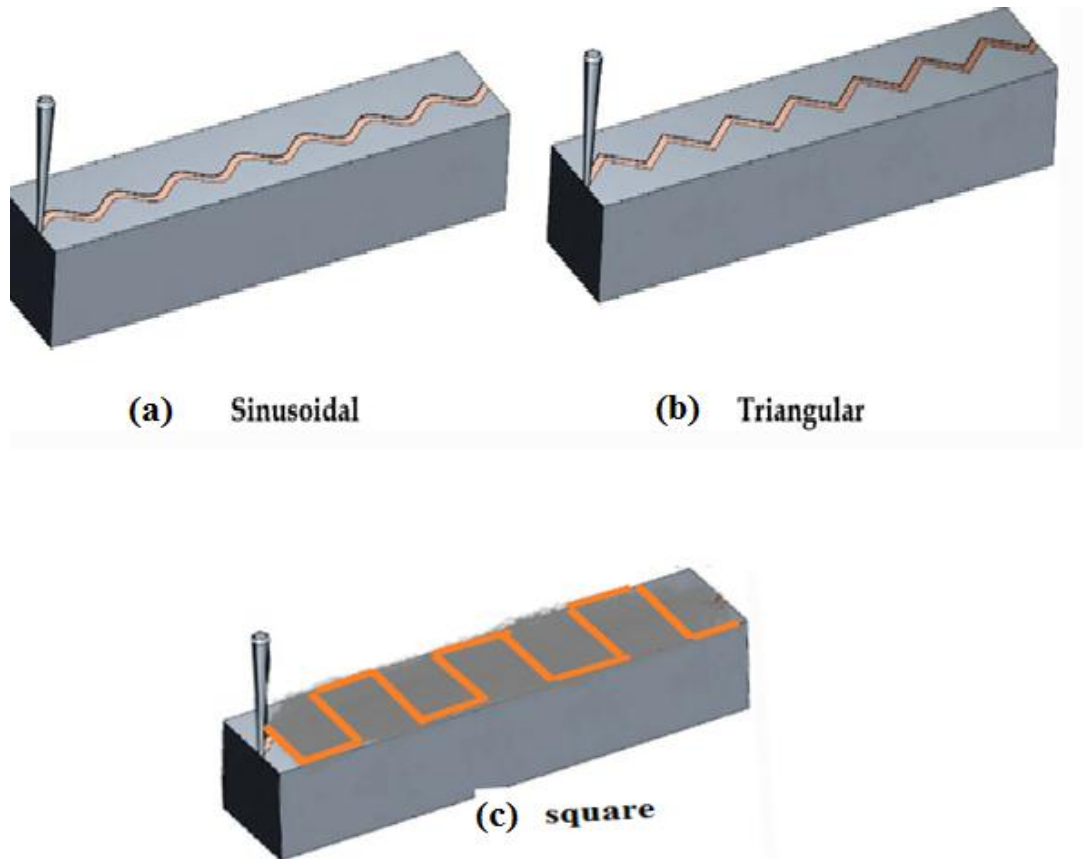
**Table 2.2** Mechanical properties of of A653 galvanized steel

<b>Mechanical properties</b>	<b>Yield strength (MPa)</b>	<b>Ultimate tensile strength (MPa)</b>	<b>Elongation (%)</b>	<b>Hardness (Hv)</b>
ASTM A653 Galvanized steel	277.5	363.8	37.5	121

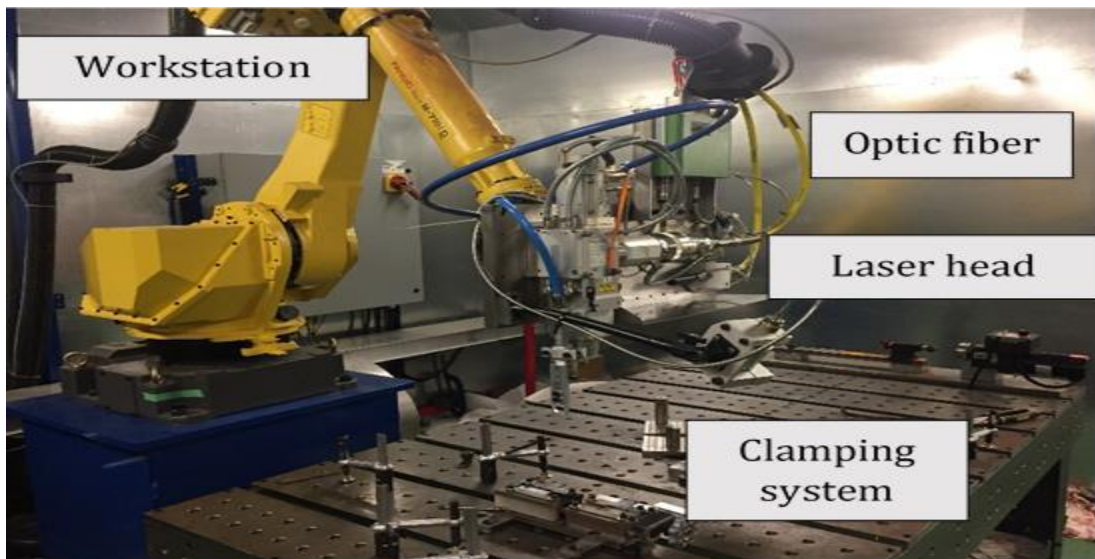
### 2.6.1.2 The laser welding system

An Nd: YAG laser source was utilized throughout the welding process. The laser head, a HIGHYAG BIMO, was powered by an IPG YLS-3000-ST2 fiber laser and was mounted on a FANUC M-710IC robot, with the robot arm allowing the laser beam to move in 6 axes. One 200  $\mu$ m diameter optical fiber is used to transmit the laser's power. Scanning patterns are performed using a mirror scanner mounted on the ILVDC-Scanner system, which utilizes a directly driven motor to rotate the mirror of the scanner to a controlled angle in order to scan the surface being treated. The ILVDC scanner operates at frequencies up to 1 kilohertz. The laser source has a peak power of 3000 W, a wavelength of 1070 nm, a focal length of 310 mm and a range of welding speeds. In this experiment,

the laser's focal spot had a diameter of 0.2 mm, but that could be adjusted with a collimator. Three distinct beam spot motion patterns were analysed in this investigation (see **Figure 2.1**). **Figure 2.2** depicts the primary components of the laser cell.



**Figure 2.1** Schematic diagram of three modes used for laser welding (a) Sinusoidal pattern (b) Triangular pattern and (c) Square pattern



**Figure 2.2** Laser welding configuration used for the experiments on A653 galvanized steel

Effects of Laser Power, Welding Speed, and Oscillation Pattern on Joint Tensile Strength are Analyzed. The maximum, average, and minimum values of laser power factors and welding speed for the three types of laser beam oscillations are shown in **Table 1.3**. The parameters used in the welding process were settled upon following preliminary experimental tests. Taguchi's L9 orthogonal method was used to obtain the parameter combinations presented in **Table 1.4**.

#### **2.6.1.3 Tensile test**

Welded galvanized steel alloy sheets were machined and cut for testing. Three pieces were used for tensile strength measurements, and one piece was prepared for microhardness measurements. The tensile tests of the three specimens of each experimental series were performed at room temperature according to ASTM E-8 using an MTS 810 tensile testing machine at a constant speed of 0.025 mm/min.

#### **2.6.1.4 Micro-hardness measurement**

One specimen from each experimental condition was made into ready samples for microhardness measurement. The Vickers microhardness method was used for the hardness testing (ST-2000). The microhardness along the fusion zone (section perpendicular to the tool path of the welded steel alloy plates, i.e., a 5-mm measuring line



to the right and left of the weld center) was determined by inserting polished specimens into a hardness tester. The applied load was 200 g for 10 s.

## 2.6.2 Methods

### 2.6.2.1 The response surface method

The objective of the response surface methodology (RSM) is to identify and plot the relationship between the underlying mean responses and the input control variables that affect those responses [19]. In this method, the answer may be written as  $y = f(X_1, X_2, X_3 \dots \dots \dots X_i) + \varepsilon$ . Where 'f' is the response function that depends on the independent random variables  $X_i$  and  $\varepsilon$  is a derivative that represents other variability sources.

In this study, the output responses are UTS and tensile strength index. The random input variables are the interplay between laser power, welding speed and welding beam mode (oscillation patterns). The response surface method was used to maximize the impact of laser welding parameters (laser power, welding speed) during welding using three types of beam oscillation patterns (sinusoidal, triangular and square). Taguchi-based experimental design was used to vary the main welding parameters to select the optimal values through a quadratic model.

### 2.6.2.2 Statistical analysis of data

The behavior of the hardness was explained by a full polynomial model of second order as per the following equation [20]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n (\beta_i X_i) + \sum_{i=1}^n (\beta_{ii} X_i^2) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\beta_{ij} X_i X_j)$$

This kind of model allows estimating a response surface in order to investigate linear effects, quadratic effects and interactive effects.:

- y: represents the response function,
- $\beta_0$  : the polynomial constant that expresses the general average effect.

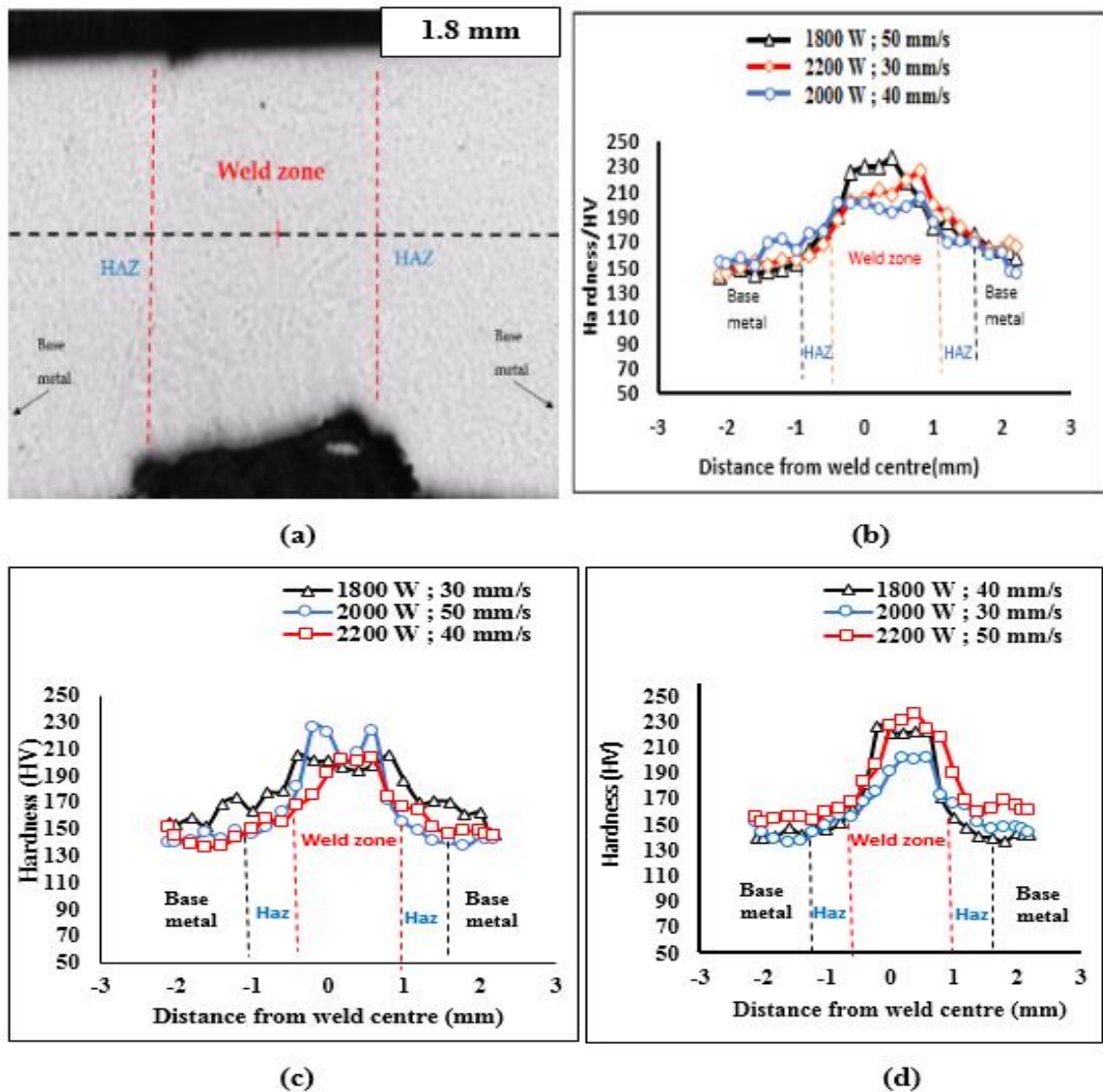
- $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$  and  $\beta_{ij}$  : the coefficients of the linear, quadratic, and interaction effects, respectively.
- $X_i$  and  $X_j$  : independent coded variables

MINITAB software was utilized to identify the polynomial coefficients for each response. The level of significance of the coefficients was determined using the weld test and the p. The verification of the fitted models was done by the R<sup>2</sup> regression coefficient, and their statistical significance was done by the t-test. When R<sup>2</sup> has high values, it indicates that the model correctly predicts the new observations and when it has low values it shows that the model fits the existing data well.

## **2.7 RESULTATS AND DISCUSSION**

### **2.7.1 Microhardness analysis**

Micro-Vicker hardness profiles of all weldments with different welding parameters are displayed in **Figure 2.3** (laser power and welding speed). Microhardness is seen to increase at the welding or fusion zone, decrease at the heat-affected zone, and return to the base metal.



**Figure 2.3** The hardness distributions for all the welded samples with different parameters: (a) Cross-section view of the welded joints indication of various zones (b) Square pattern (c) Triangular pattern (d) Sinusoidal pattern for A653 galvanized steel

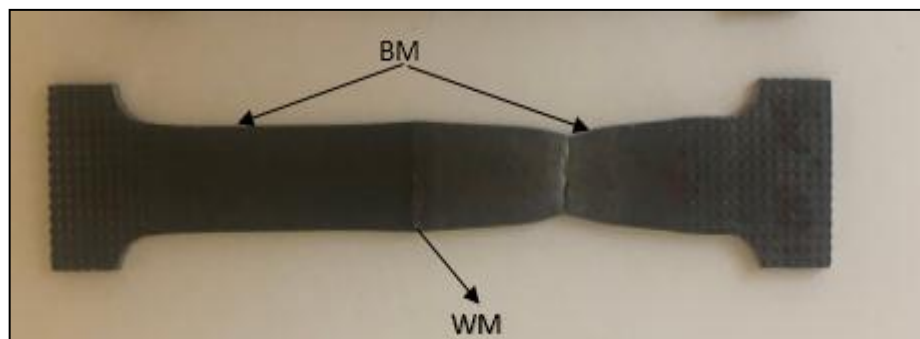
The average micro-hardness of the weld zone of the sinusoidal model which is shown in **Figure 2.3** (b) is about 216.85 HV for the welding parameters of  $P=2200\text{ W}$  and  $v=50\text{ mm/s}$ . In addition, the same sample has an average value of about 210 HV in the weld zone with the welding parameters  $P=1800\text{ W}$  and  $v=40\text{ mm/s}$  as shown in **Figure 2.3** (b). Furthermore, it can also be seen in **Figure 2.3** (b) that for the welding parameters of  $P=2000\text{ W}$  and  $v=30\text{ mm/s}$ , the weld zone depicts an average of about 198.5 HV. Similar

trend can be seen for triangular and square patterns as shown in **Figure 2.3** (c) and (d). In comparison, the average microhardness values of sinusoidal pattern wave are higher for all the varying parameters as compared to triangular and square patterns.

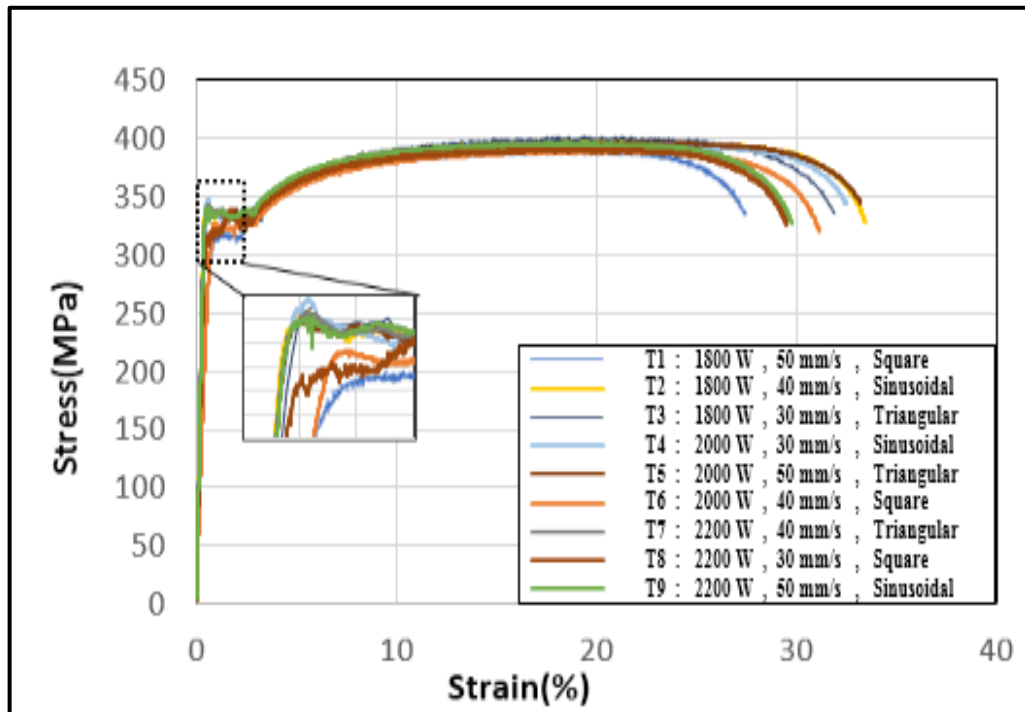
### 2.7.2 Measured experimental values of the ultimate tensile strength

All welding experiments are completed, and tensile test results are obtained for each welding condition and mode. As can be seen in **Figure 2.4**, all specimens were broken from the weld area and the heat-affected area at the parent metal. The results of the tests are depicted graphically in **Figure 2.5** as stress-strain curves. The elastic regions of the curves appear to be similar in slope, indicating that Young's modulus is unaffected by the experimental conditions. However, as summarised in **Figure 2.6** and **Table 2.3**, there is variation between the tests about UTS. Test 2 indicates the highest UTS of approx. 397.51 MPa and the lowest value is shown by test 6 with a UTS of approx. 389.65 MPa. Even though the value of the welding speed factor has not changed, the tensile strength has increased. The results show that the speed factor has negligible impact on tensile strength. However, laser power and Oscillation Pattern play an important role in the variation of tensile strength values.

The SEM images of the fractured surface after tensile testing are shown in **Figure 2.7**. This figure is representative of all the weldments as each weldment showed "cup and cone" fracture mode. The pattern known as "cup and cone" is produced by a mechanism referred to as "micro-void coalescence," and it is indicative of a ductile fracture mechanism.



**Figure 2.4** Representative top view of the broken specimen from the butt joint tensile tests welded at 1800 W and welding speed of 30 mm/s with a triangular weld pattern for A653 galvanized steel.

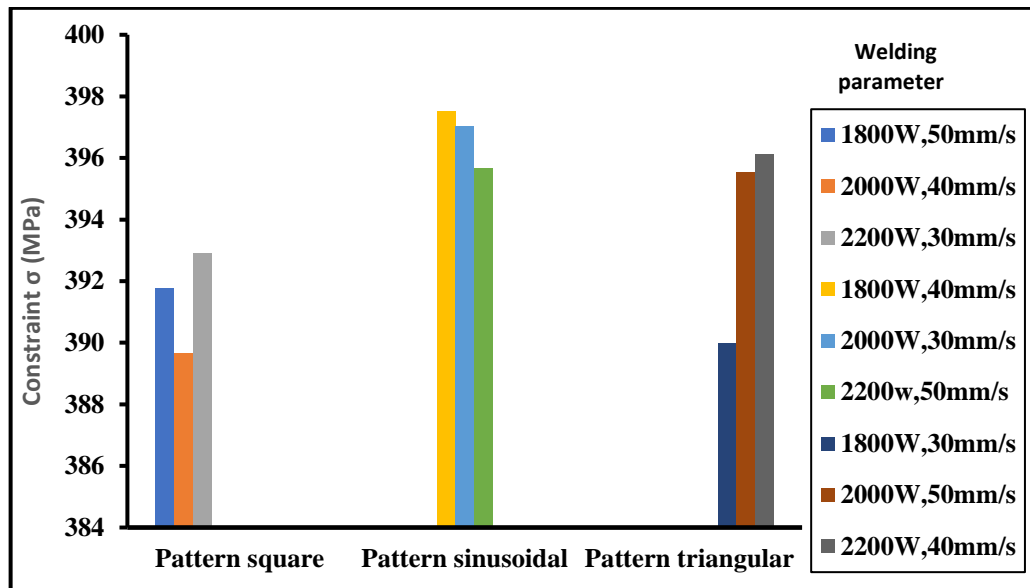


**Figure 2.5** Stress-strain curves for all the weldments for A653 galvanized steel

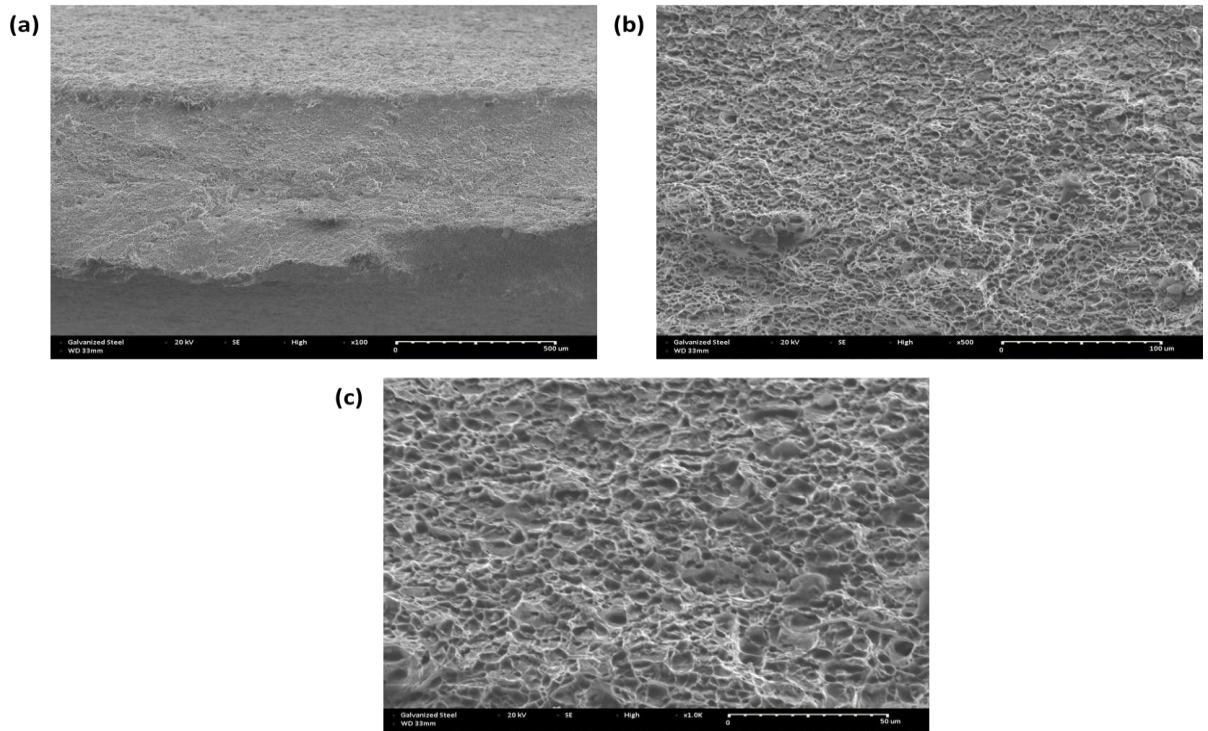
**Table 2.3** UTS values for all the welding conditions of A653 galvanized steel

S. No.	Laser Power (W)	Welding Speed (mm/s)	Pattern Type	Ultimate Tensile Strength (MPa)
1	1800	50	Square	391.79
2	1800	40	Sinusoidal	397.51
3	1800	30	Triangular	389.99
4	2000	30	Sinusoidal	397.05

5	2000	50	Triangular	395.54
6	2000	40	Square	389.65
7	2200	40	Triangular	396.13
8	2200	30	Square	392.92
9	2200	50	Sinusoidal	395.68



**Figure 2.6** Histogram of the comparison between the three types of laser beam oscillation weldments for A653 galvanized steel



**Figure 2.7** Representative SEM images of the fractured surface of a tensile specimen for A653 galvanized steel welded by a sinusoidal pattern

### 2.7.3 Development and selection of the response model

#### 2.7.3.1 Modeling of the UTS response

We found the correlation between the input variables and the outcomes by estimating a response surface for each parameter. From **Table 2.4**, and after analyzing the major factors, namely laser power (P), welding speed (v), and oscillation mode (M). We noticed that the factor ‘M’ has the largest contribution which is approx. 58.18%, with a P value of  $0.003 < 0.05$  for the measured ultimate tensile strength (UTS). Furthermore, we observed the factor ‘P’ with an average contribution of approx. 6.81%, with a P value of  $0.003 < 0.05$ . Finally, the factor ‘v’ showed a lesser contribution of  $\approx 2.14\%$  with a P value of  $0.005 < 0.05$ . Moreover, the effects of bidirectional interactions were also analyzed and it was observed that the interaction (v \* v) depicts a contribution in lower value of  $\approx 0.72\%$ , which is not significant owing to its value of P i.e.,  $0.104 > 0.05$ . Interaction (P \* v) showed a higher contribution of  $\approx 22.89\%$ , with a P value of  $0.004 < 0.05$ .

**Table 2.4** Tensile strength model using ANOVA analysis of A653 galvanized steel

Variable	DDL	Square Sum	Contribution (%)	Medium Square	F-Value	P-Value
Laser Power	1	4.93	6.81	25.53	286.20	0.003
Welding Speed	1	1.55	2.14	18.65	209.15	0.005
Oscillation Pattern	2	42.12	58.18	32.39	363.09	0.003
Two-factor interaction: v * v	1	0.72	1.00	0.72	8.12	0.104
Two-factor interaction: P * v	1	22.89	31.62	22.89	253.63	0.004
Error	2	0.17	0.25	0.08		
Total	8	72.39	100			
S	R-sq	R-sq(adj)		PRESS		R-sq(pred)
0.298682	99.75%	99.01%		3.18089		95.61%

The mathematical model determined by the above analysis is shown below in the following form:

Square Pattern:  $UTS = 233,54 + 0,07220 P + 3,915 v - 0,00602 v * v - 0,001692 P*v$

Sinusoidal Pattern:  $UTS = 242,22 + 0,07220 P + 3,915 v - 0,00602 v * v - 0,001692 P*v$

Triangular Pattern:  $UTS = 239,36 + 0,07220 P + 3,915 S - 0,00602 v * v - 0,001692 P*v$

**Table 2.5** Coefficient of the tensile strength model of A653 galvanized steel

Term	Coefficient	P value
Constant	238,37	0.001
P	0,0722	0.003
v	3,915	0.005
M		
Square	-4,831	0.002



Sinusoidal	3,846	0.002
Triangular	0,986	0.025
v * v	-0,006	0.104
P* v	-0,0017	0.004

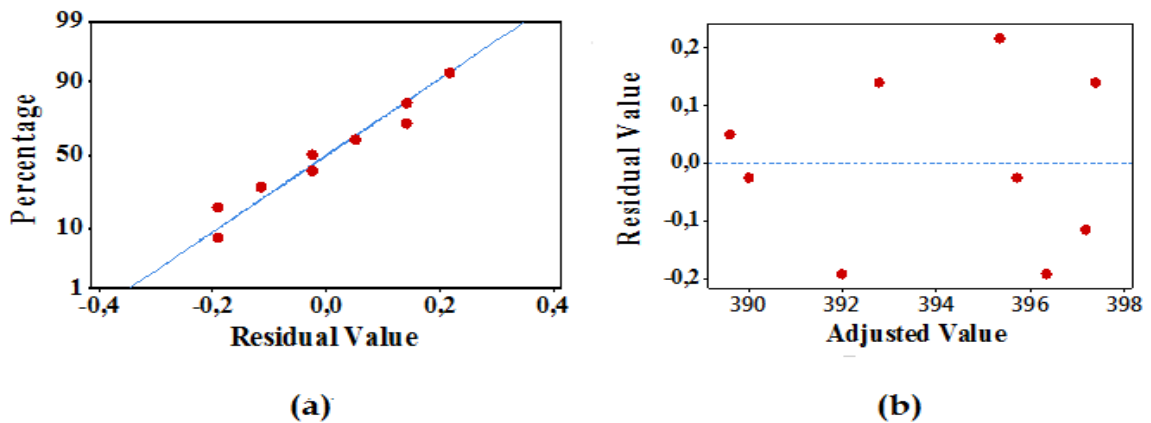
**Table 2.5** shows that the linear effects of laser welding parameters: laser power, welding speed, welding mode, and interaction (P\*v) are significant as the P values of these coefficients are less than 0.05. The other model term (the v\*v interaction) is not significant because the value of P is greater than 0.05, so it will be eliminated to simplify the model. The response of UTS can be summarized in the following final model:

$$\text{Pattern Square: } \mathbf{UTS = 233,54 + 0,07220 P + 3,915 v - 0,001692 P*v}$$

$$\text{Pattern Sinusoidal: } \mathbf{UTS = 242,22 + 0,07220 P + 3,915 v - 0,001692 P*v}$$

$$\text{Pattern Triangular: } \mathbf{UTS = 239,36 + 0,07220 P + 3,915 v - 0,001692 P*v}$$

**Figure 2.8** displays the results of inspecting residual plots to confirm that the model fits the data. In **Figure 2.8**, we see that the data (i.e., the residuals) follow a straight line, indicating that the errors have a normal distribution. The assumption that the residuals are normally distributed was met, according to the findings of Zhao *et al.* [21]. By analyzing the fit, we were able to gain further insight into the validity of the regression model. In appearance, the residuals are uniformly distributed between the extremes of the fitted values indicating that the assumption of the regression model was met across the board for the fitted values.



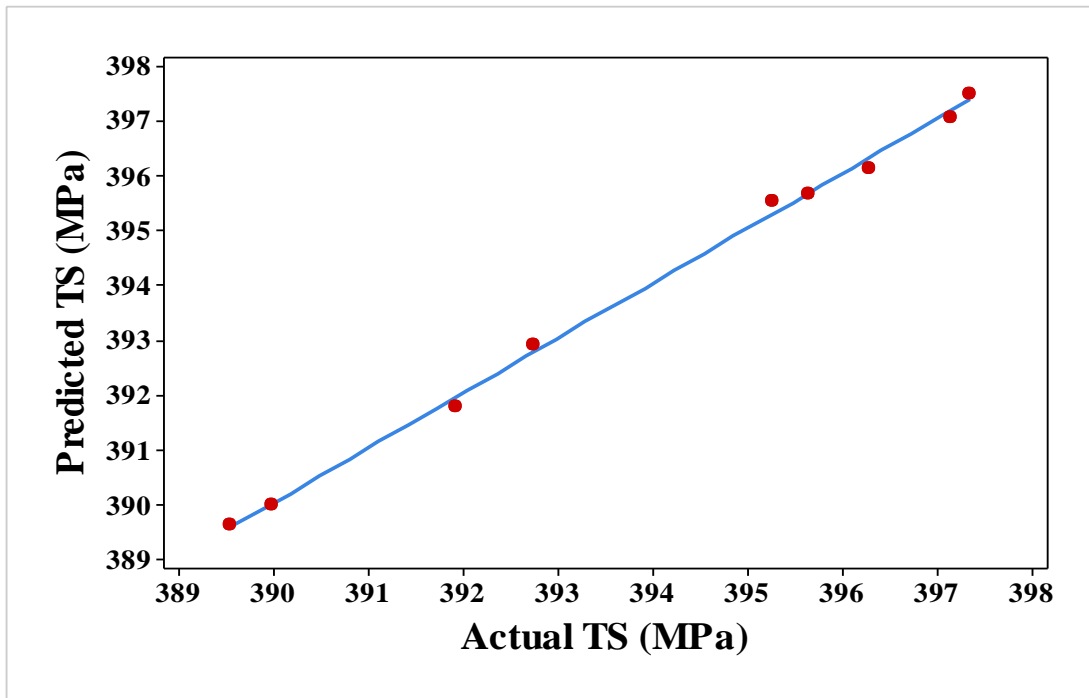
**Figure 2.8** Residual plots for UTS Response of A653 galvanized steel mild steel (a) Normal probability plot (b) normal probability residual as a function of the fitted value

### 2.7.3.2 Variation of the developed model

For each of the nine separate experiments, predicted and actual values were determined and compared. **Table 2.6** demonstrates that for all 9 possible parameter configurations, the discrepancies between the predicted and experimental tensile strengths are less than 4%. This may suggest that tensile strength predictions based on the model of each weld shape are reasonably accurate. In **Figure 2.9**, we see a comparison between the fitted values and the observed values. As the figures show, the residuals in the prediction of each response are small and cluster around the diagonal, suggesting that the developed models are sufficient.

**Table 2.6** Variation of test results for A653 galvanized steel

S. No.	Laser Power (W)	Welding Speed (mm/s)	Pattern Type	Ultimate Tensile strength value (MPa)		Error (%)
				Experimental	Model predicted	
1	1800	50	Square	391.79	391.92	0.03
2	1800	40	Sinusoidal	397.51	397.34	0.05
3	1800	30	Triangular	389.99	389.98	0.001
4	2000	30	Sinusoidal	397.05	397.13	0.02
5	2000	50	Triangular	395.54	395.26	0.07
6	2000	40	Square	389.65	389.55	0.02
7	2200	40	Triangular	396.13	396.27	0.03
8	2200	30	Square	392.92	392.74	0.04
9	2200	50	Sinusoidal	395.68	395.64	0.01

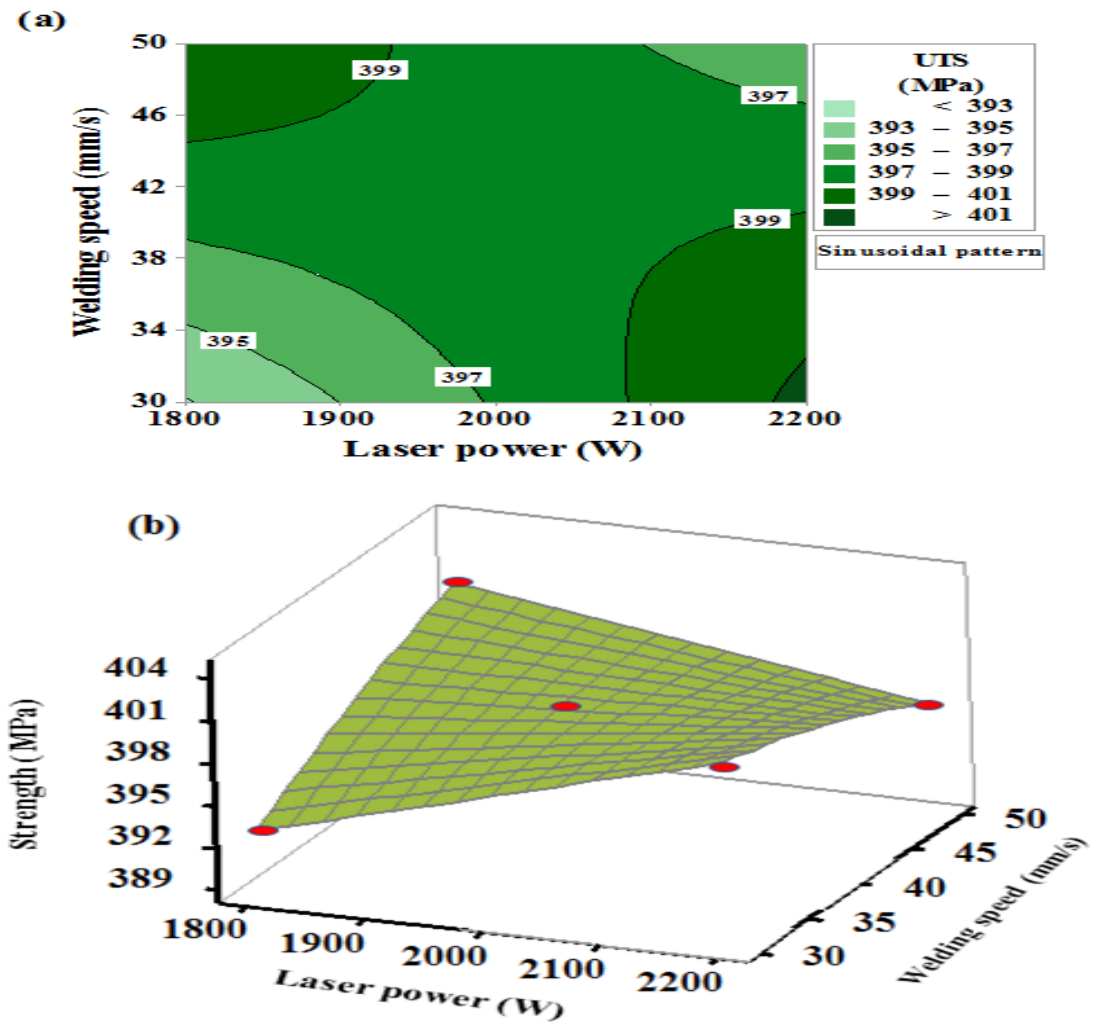


**Figure 2.9** Comparison of the measured values with the fitted values for the model of A653 galvanized steel

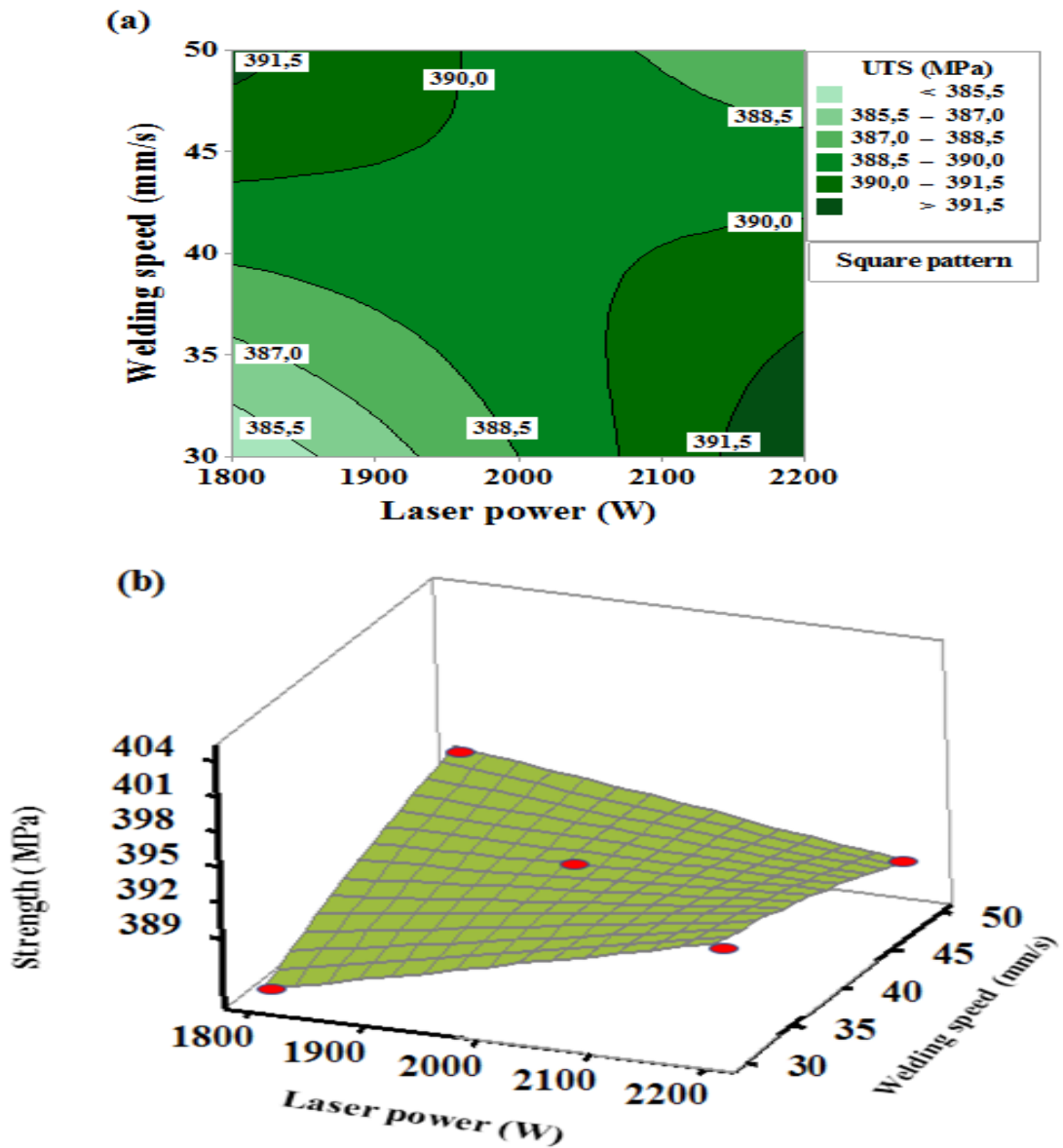
## 2.7.4 Interaction effects and optimization of process variables

### 2.7.4.1 Response surface method

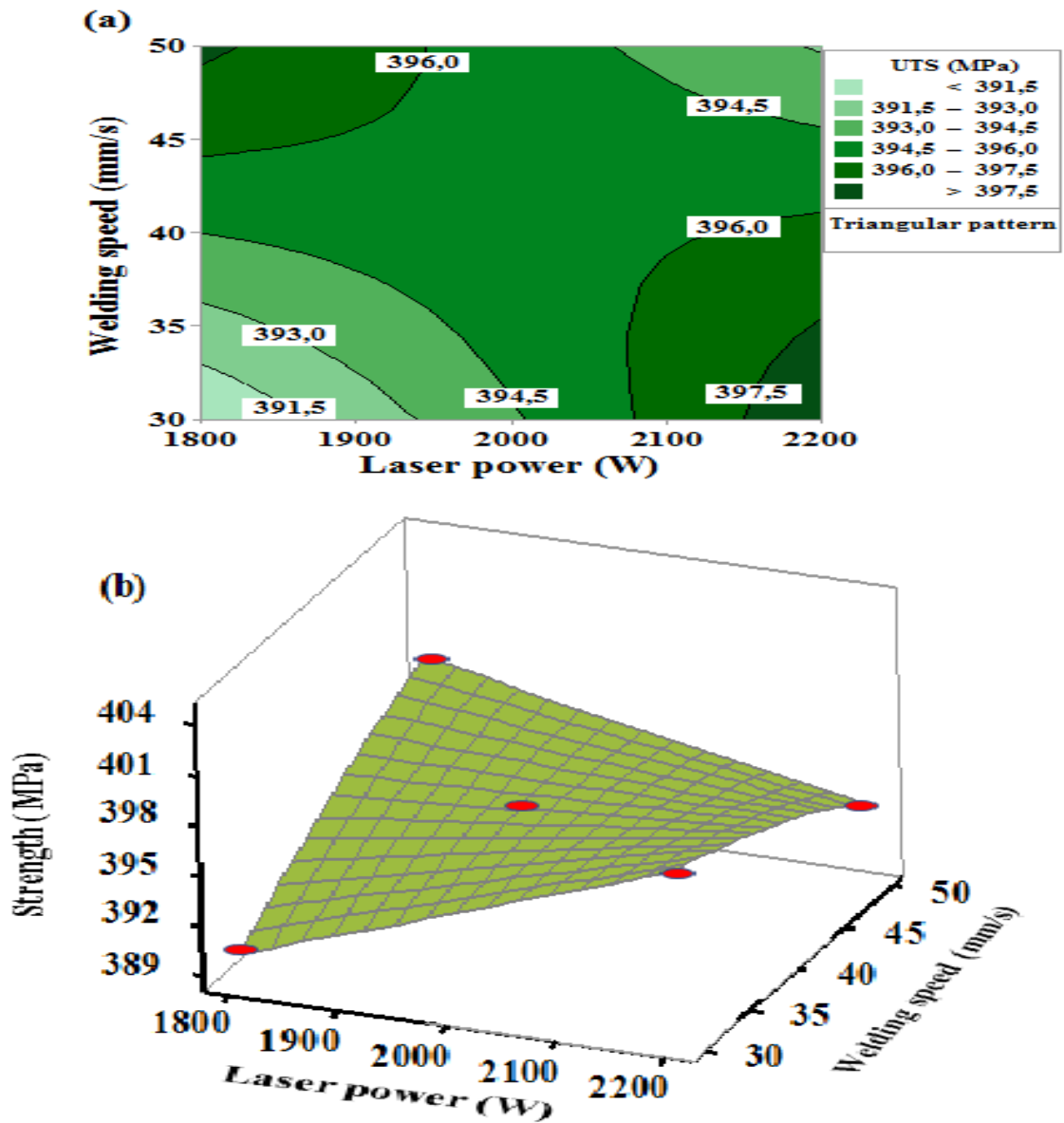
An efficient method to search for outputs from the value of given parameters is to plot response surfaces that provide an overview of all possible outcomes as a function of the inserted inputs. Response parameters in our case are laser power and welding speed for each welding oscillation pattern, yielding an ultimate tensile strength obtained from the model. **Figure 2.10**, **Figure 2.11**, and **Figure 2.12** show a region where for a certain value of laser power and welding speed, the highest tensile strength can be obtained. This optimal result is obtained with high laser power i.e., 2100 W and 2200 W, and high welding speeds of 45 mm/s and 50 mm/s. The study of the main effects graph is consistent with the results of the response surfaces. **Figure 2.13** shows that the increase in laser power and welding speed during sinusoidal oscillation laser welding causes a significant increase in UTS tensile strength. It can be concluded that the optimal setting of laser power, welding speed, and Oscillation Pattern are respectively 2200 W, 50 mm/s, and sinusoidal oscillation pattern.



**Figure 2.10** Sinusoidal pattern (a) Contours plots (b) The effect of laser power and welding speed on the sinusoidal pattern weldment's tensile behavior shown using the response surface diagram for A653 galvanized steel



**Figure 2.11** Square pattern (a) Contours plots (b) The effect of laser power and welding speed on the square pattern weldment's tensile behavior shown using the response surface diagram for A653 galvanized steel



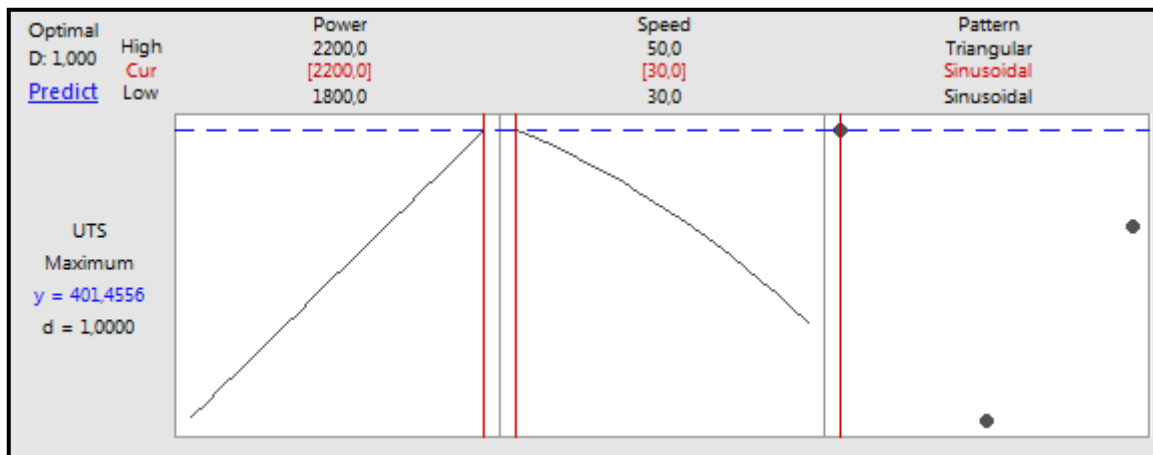
**Figure 2.12** Triangular pattern (a) Contours plots (b) The effect of laser power and welding speed on the triangular pattern weldment's tensile behavior shown using the response surface diagram for A653 galvanized steel



**Figure 2.13** Graph of the main effects of the UTS response for A653 galvanized steel

#### 2.7.4.2 Process parameters optimization

To that end, we set out to find the optimal settings for a laser welder. In order to find the best settings for laser welding, we used the desirability approach. The Minitab software was used to estimate the predicted values of  $d$  varying from 0 to 1 with optimum values when  $d = 1$  and acceptable values when  $d > 0.7$ . In our case, the goal was to maximize the UTS. Optimization outcomes are displayed in **Figure 2.14**. The optimal welding conditions determined are laser power of 2200 W, 30 mm/s welding speed, and sinusoidal pattern. The expected response for the optimal combination is to get the UTS value of 401.45 MPa with desirability of 1.



**Figure 2.14** UTS response optimization diagram for A653 galvanized steel

## 2.8 CONCLUSION

In this study, laser welding was conducted on 1.8mm thick galvanized steel sheets and the impact of laser power, welding speed, and oscillation mode were investigated. The results indicated that the microhardness of all samples peaked in the weld/fusion zone and decreased gradually towards the base metal. The sinusoidal pattern showed the highest microhardness values. Additionally, the ultimate tensile strength of the sinusoidal pattern was superior to the triangular and square patterns. Based on the microhardness and tensile strength analyses, the optimal combination of welding parameters was identified, which included a laser power of 2200 W, a welding speed of 50 mm/s, and the use of the sinusoidal welding mode. To achieve a UTS of 401.45 MPa, the suggested parameters were a laser power of 2200 W, a welding speed of 30 mm/s, and the use of the sinusoidal pattern of welding.

## 2.9 REFERENCE

- [1] H. Bley, L. Weyand, and A. Luft, "An Alternative Approach for the Cost-efficient Laser Welding of Zinc-coated Sheet Metal," *CIRP Ann.*, vol. 56, pp. 17-20, 2007.
- [2] Y. Zhao, Y. Zhang, W. Hu, et al., "Optimization of laser welding thin-gage galvanized steel via response surface methodology," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 50,



pp. 1267-1273, 2012.

- [3] P. Peças, M. Henrique, R. M. Miranda, et al., "Laser welding of low-thickness zinc-coated and uncoated carbon steel sheets," *Opt. Quantum Electron*, vol. 27, pp. 1193-1201, 1995.
- [4] W. Chen, P. Ackerson, and P. Molian, "CO2 laser welding of galvanized steel sheets using vent holes," *Mater. Des.*, vol. 30, pp. 245-251, 2009.
- [5] M. P. Graham, D. M. Hirak, H. W. Kerr, et al., "Nd:YAG laser welding of coated sheet steel," *J. Laser Appl.*, vol. 6, p. 212, 2012.
- [6] Q. Huang, J. Hagstroem, H. Skoog, et al., "Effect of CO2 laser parameter variations on sheet metal welding," *Int. J. Join. Mater.*, vol. 3, pp. 79-88, 1991.
- [7] H. Huegel, "Lasers in manufacturing: proceedings of the 5th International Conference, 13-14 September 1988, Stuttgart, West Germany," p. 299, 1988.
- [8] J. Ma, F. Kong, B. Carlson, et al., "Two-pass laser welding of galvanized high-strength dual-phase steel for a zero-gap lap joint configuration," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, pp. 495-507, 2013.
- [9] Z. Chen, S. Yang, C. Wang, et al., "A study of fiber laser welding of galvanized steel using a suction method," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, pp. 1456-1465, 2014.
- [10] Y. Zhang, Q. Li, L. Xu, et al., "A mechanistic study on the inhibition of zinc behavior during laser welding of galvanized steel," *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 137, p. 011011, 2015.
- [11] Y. Hao, N. Chen, H. P. Wang, et al., "Effect of zinc vapor forces on spattering in partial penetration laser welding of zinc-coated steels," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 298, p. 117282, 2021.
- [12] Z. Wan, H. P. Wang, J. Li, et al., "Novel measures for spatter prediction in laser welding of thin-gage zinc-coated steel," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 167, p. 120830, 2021.

- [13] Z. Jiang, X. Chen, H. Li, et al., "Grain refinement and laser energy distribution during laser oscillating welding of Invar alloy," *Mater. Des.*, vol. 186, p. 108195, 2020.
- [14] L. Li, J. Gong, H. Xia, et al., "Influence of scan paths on flow dynamics and weld formations during oscillating laser welding of 5A06 aluminum alloy," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 11, pp. 19-32, 2021.
- [15] C. Zhang, X. Li, and M. Gao, "Effects of circular oscillating beam on heat transfer and melt flow of laser melting pool," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, pp. 9271-9282, 2020.
- [16] T. Liu, Z. Mu, R. Hu, et al., "Sinusoidal oscillating laser welding of 7075 aluminum alloy: Hydrodynamics, porosity formation and optimization," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 140, pp. 346-358, 2019.
- [17] D. Rizzi, T. Sibillano, P. Pietro Calabrese, et al., "Spectroscopic, energetic and metallographic investigations of the laser lap welding of AISI 304 using the response surface methodology," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 49, pp. 892-898, 2011.
- [18] American Welding Society, "Welding Handbook-Materials and applications," *Am. Weld. Soc.*, vol. 4, p. 982, 1991.
- [19] L. E. Chávez-Valencia, A. Manzano-Ramírez, G. Luna-Barcenas, et al., "Modelling of the performance of asphalt pavement using response surface methodology," *Build. Environ.*, vol. 40, pp. 1140-1149, 2005.
- [20] J. Forsberg and L. Nilsson, "Evaluation of response surface methodologies used in crashworthiness optimization," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 32, pp. 759-777, 2006.
- [21] D. Zhao, Y. Wang, D. Liang, et al., "Modeling and process analysis of resistance spot welded DP600 joints based on regression analysis," *Mater. Des.*, vol. 110, pp. 676-684, 2016..

## CHAPITRE 3

### **Effet des modèles d'oscillation du faisceau sur le soudage laser de l'acier inoxydable 304L : Une étude expérimentale et de modélisation**

Said Ouamer <sup>1</sup>, Nouredine Barka <sup>1</sup>, Asim Iltaf <sup>2</sup>, Karim Bensalem <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mathematics, Computer Science and Engineering, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec, Canada

*Cet article a été soumis dans Key Engineering Materials (KEM) portant le numéro de référence JMMME-23-1271*

#### **3.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU TROISIÈME ARTICLE**

Les avantages du soudage au laser par rapport aux méthodes plus conventionnelles ont conduit à son utilisation généralisée dans l'industrie moderne. Il est difficile d'imaginer le commerce moderne sans l'utilisation du traitement laser, étant donné qu'il est largement utilisé dans des secteurs tels que la construction navale, l'automobile et l'aviation. Le soudage au laser est une technologie intéressante qui permet d'améliorer la qualité des joints soudés et auto-soudés tout en permettant un haut degré d'automatisation des processus. Compte tenu de la complexité des processus physiques multidimensionnels, il est pertinent de comprendre l'effet des paramètres de soudage au laser sur la qualité des joints soudés. Cet article examine la résistance à la traction des soudures, ainsi que les effets des paramètres de soudage au laser et leurs interactions. En utilisant la méthode Taguchi et en définissant un plan expérimental L9, cette recherche a examiné les effets de trois types d'oscillations du faisceau laser (sinusoïdal, triangulaire et carré) avec des paramètres variables sur la qualité de la soudure des tôles en alliage d'acier inoxydable 304L. En outre, une comparaison des trois types de soudure a été effectuée. Des essais de traction conformes à la norme ASTM E-8 ont été réalisés à température ambiante, et les données ont été analysées par ANOVA et régression pour alimenter les modèles

mathématiques. Les paramètres de soudage au laser ont été affinés à l'aide de l'approche de désirabilité.

**Mots clés :** Soudage au laser, acier inoxydable 304L, oscillations du faisceau laser, résistance à la traction, ANOVA.

Ce troisième article, intitulé « *The effect of beam oscillation patterns on the laser welding of 304L stainless steel : An experimental and modeling study* » a été coécrit par moi-même ainsi grâce à la collaboration de l'équipe de recherche du professeur Nouredine Barka. Il a été soumis pour publication dans sa version finale en 2022 par le *key engineering materials (KEM)*. Comme premier auteur, ma contribution à ce travail a été la recherche essentielle sur l'état de l'art, le développement de la méthode, les tests de performance et la rédaction de l'article. Le professeur Barka, deuxième auteur, a fourni la première idée. Il a également participé à la recherche de pointe, au développement de la méthodologie ainsi qu'à la révision de l'article.

### **3.2 TITRE DU TROISIÈME ARTICLE**

**The effect of beam oscillation patterns on the laser welding of 304L stainless steel: An experimental and modeling study**

### **3.3 ABSTRACT**

The advantages of laser welding over more conventional methods have led to its widespread use in modern industry. It is difficult to imagine modern commerce without the use of laser processing, as it is widely used in industries such as shipbuilding, automotive and aviation. Laser welding is an interesting technology that improves the quality of welded and self-welded joints while allowing a high degree of process automation. Given the complexity of multidimensional physical processes, it is relevant to understand the effect of laser welding parameters on the quality of welded joints. This paper examines the tensile strength of welds, as well as the effects of laser welding parameters and their interactions. Using the Taguchi method and defining an L9 experimental design, this research examined the effects of three types of laser beam oscillations (sinusoidal, triangular and square) with varying parameters on the weld quality of 304L stainless steel alloy sheets. In addition, a comparison of the three types of welding was performed. Tensile tests conforming to ASTM E-8 were performed at

room temperature, and the data were analyzed by ANOVA and regression to feed the mathematical models. The laser welding parameters were refined using the desirability approach.

**Keywords:** Laser welding, 304L stainless steel, laser beam oscillations, tensile strength, ANOVA.

### 3.4 NOMENCLATURE

<b>ANOVA</b>	Analysis of variance
<b>ASS</b>	Austenitic stainless steel
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>BH</b>	Bake Hardening
<b>BM</b>	The base metal
<i>d</i>	Linear desirability
<b>HAZ</b>	Heat affected zone
<b>HV</b>	Hardness in Vickers
<b>M</b>	Welding pattern
<b>P</b>	Laser power
<b>RSM</b>	The response surface methodology
<b>SS</b>	Stainless steel
<b>v</b>	Speed
<b>UTS</b>	Ultimate tensile strength
<b>WM</b>	The welding metal

### 3.5 INTRODUCTION

Laser welding is superior to friction welding and gas tungsten arc welding due to its superior depth-to-width ratio, smaller heat-affected zone, and increased processing efficiency [1]. It has been widely employed in a variety of fields, including aerospace manufacturing, the automobile industry, and shipbuilding [2]. Austenitic stainless steel is widely used for a wide range of mechanical and structural applications due to its advantageous mechanical properties and low cost [3]. Currently, welded structures account for a considerable portion of component assembly [4].

The increased corrosion resistance, toughness, aesthetics, and mechanical properties of stainless steel have led to its extensive use in the construction industry [5]. However, the design's inefficiency is reduced by the costly materials and high initial cost. However, the inefficiency of the design is a result of the high cost of materials and the high initial investment. Unlike carbon steel, stainless steel lacks a well-defined yield point and exhibits substantial strain hardening [6,7]. However, the design provisions are largely based on the assumption of a perfect elastic-plastic material, making it easier for design engineers to use the new material. However, the inefficiency of the current design process, which increases structural costs, restricts the widespread application of SS in structural engineering. Gardner and Nethercot [8,9] and Young and Lui [10] reported accurate experimental and numerical modeling findings that validated the carbon steel design method for stainless steel buildings. In both instances, the researchers determined that the load-bearing capacity of the structural components was underestimated when the carbon steel design approach was utilized. Due to this, Gardner and Theofanous [11] presented new design strategies to increase the efficiency of stainless-steel structures.

According to De Baglion and Mendez [12], austenitic stainless steel 304L is commonly used in the fabrication of nuclear power components such as reactor vessels and pressurized water reactor (PWR) piping systems. Its high corrosion resistance and solderability make it a popular material. Hung et al. [13] investigated the influence of laser welding modes on the microstructure and mechanical properties of 304L stainless steel components manufactured by additive manufacturing using laser film printing. Due to the lack of martensitic structure formation in the weld heat-affected zone (HAZ), low-carbon steel alloys rarely require heat treatment before or after welding. This low-carbon

steel's enhanced resistance to intergranular stress corrosion makes it the material of choice for the nuclear industry.

Reducing the amount of heat applied during the welding process is crucial for producing high-quality welds with minimal thermal distortion, according to studies on the weldability of various types of stainless-steel sheets. In addition, only the appropriate parameters optimize laser welding [14-16]. Without proper welding, the weld will be the installation's weak link, affecting its overall performance, quality, durability, and safety. [17,18]. Therefore, the objective of the present research is to analyze the effect of fundamental laser welding parameters i.e., laser beam power, welding speed and oscillation pattern on tensile strength.

### 3.6 EXPERIMENTAL PROCEDURE

#### 3.6.1 Materials

Sheets of stainless-steel alloy measuring 1.8 mm x 125 mm x 50 mm were used as the base metal in this study; these sheets were provided by CBR laser Inc. (Princeville, Quebec). **Table 3.1** displays the material's chemical composition as determined by Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), while **Table 3.2** displays its mechanical properties.

**Table 3.1** chemical composition is measured by EDS of ASIS 304L

Elements	C	Si	Mn	Cr	N	Ni	P	S	Fe
<b>304L Stainless steel</b>	≤0.13	≤0.74	5.6–7.5	16.0–18.0	≤0.24	3.6–5.5	≤0.04	≤0.061	Bal.

**Table 3.2** Mechanical properties of ASIS 304L

S.No.	Hardness (Hv)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
<b>304L</b> Stainless steel	159	210	58

### 3.6.2 Laser beam welding

The laser source of the welding machine is an IPG Photonics YLS-3000 Yb+:YAG fiber laser operating at 1070 nm, and the laser head is a BIMO High YAG with a focus diameter of 0.45 mm. Laser welding is a process that requires the use of an automated workstation. All welding equipment is therefore mounted on a FANUC robot (**Figure 3.1**) [19].



**Figure 3.1** (a) Fanuc®M-710iC robot and HIGHYAG BIMO laser head (b) YLS-3000 laser source

The sheets were laser welded in butt joint configuration using three types of beam oscillations (sinusoidal, triangular, and square) as shown in **Figure 3.2** For the oscillation of the beam, a DC scanner was used the three types of beam oscillation at a constant amplitude of 1.5 mm and constant frequency of 300 Hz. Laser power, welding speed, and Oscillation Pattern are all adjusted to carry out a series of welds. Taguchi method was used to planning the laser welding experiments with an orthogonal L9 grating. This plane was chosen based on the variation of the main welding parameters such as laser power, welding speed, and welding mode, as shown in **Table 1.3**, which varies between three levels. The L-9 orthogonal array used for the laser welding tests is shown in **Table 1.4**.





**Figure 3.2** Top view of ASIS 304L sheets welded in a butt joint configuration

### **3.6.3 Characterization methods**

To obtain specimens for characterization, the welded sheets from each configuration were machined and then cut. The degree of hardness was measured with a Vickers microhardness tester (ST-2000). The micro-hardness in the fusion zone, defined as a 5 mm measuring line to the right and left of the weld centerline, was determined by placing the polished specimens in a hardness tester. The applied load and dwell time were both 200 g and 10 s.

Welded specimens were put through tensile tests at room temperature using an MTS 810 testing machine and the ASTM E-8 standard, with a constant speed of 0.025 mm/min. To ensure the accuracy of the results, we prepared and tested three samples per experimental series and averaged the results.

### **3.6.4 Analysis of the regression model (ANOVA)**

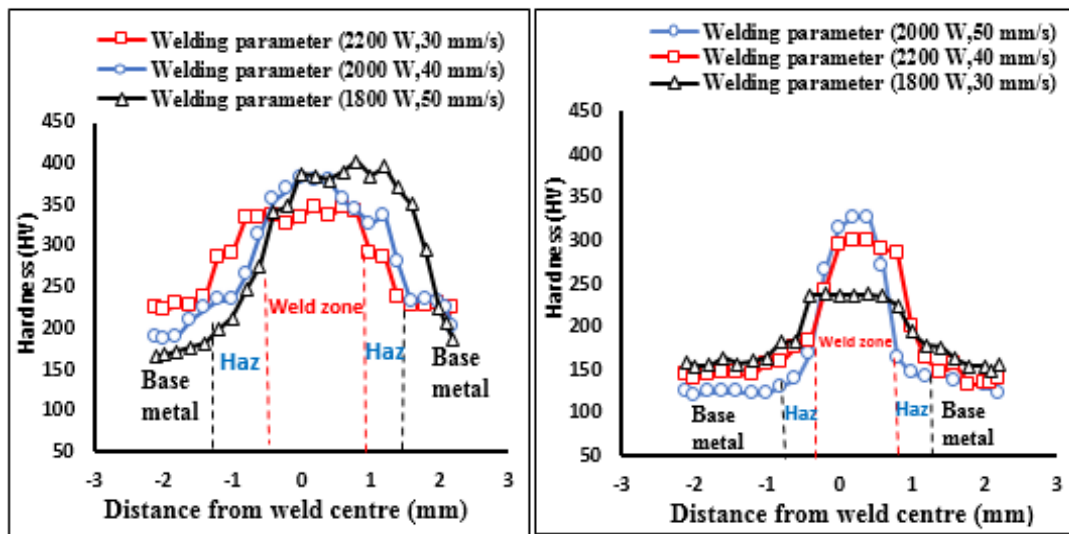
In this study, ANOVA and regression were used to create mathematical models based on the results of tensile tests performed on specimens welded using three distinct types of laser beam oscillation and varying parameters. Minitab 18 was used for the statistical analysis. The importance of factors and their interactions with responses was calculated using a 95% confidence interval. In order to develop a model that adequately fits the data, insignificant factors and interactions were eliminated. We used a hierarchical approach to model fitting, which involves excluding variables and their interactions that do not significantly affect the outcome. In the same vein, we used regression analysis to develop formulas linking key factors to outcomes. Two-dimensional contours were used to illustrate the correlation between two continuous factors and the adjusted responses. Main

effects plots were used to analyze the influence of different parameter settings on a target mean response.

## **3.7 RESULTS AND DISCUSSION**

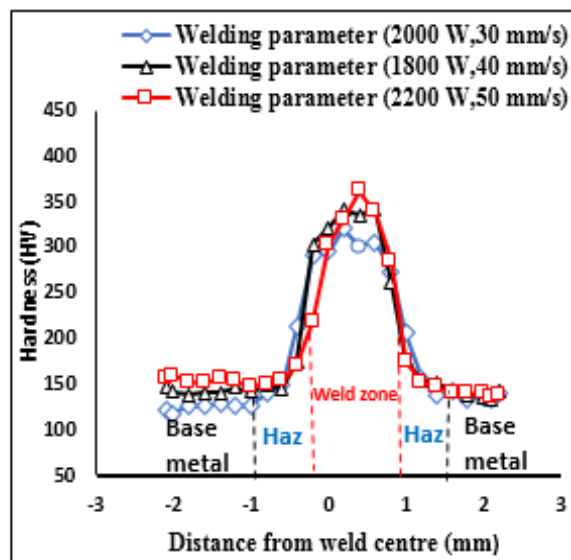
### **3.7.1 Micro-hardness**

To evaluate the mechanical properties of the welds, microhardness measurements were performed in the fusion area (as depicted in **Figure 3.3**). The results show M-shaped hardness distributions for all welding conditions. The maximum hardness values were shown by the square oscillation pattern of the beam as shown in **Figure 3.3** (a) i.e., about 403 HV with the parameters ( $P = 1800 \text{ W}$  and  $v = 50 \text{ mm/s}$ ) and about 382 HV for the 2000 W laser power and 40 mm/s welding speed. Additionally, a about 347 HV value was observed for the 2200 W laser power and 30 mm/s welding speed. The maximum hardness values for the samples welded by triangular beam oscillation as shown in **Figure 3.3** (b) was about 327 HV with parameters ( $P = 2000 \text{ W}$  and  $v = 50 \text{ mm/s}$ ) and about 300 HV with parameters ( $P = 2200 \text{ W}$  and  $v = 40 \text{ mm/s}$ ). Furthermore, a about 237 HV value can be seen with parameters ( $P = 1800 \text{ W}$  and  $v = 30 \text{ mm/s}$ ). The maximum hardness values for the specimens welded by sinusoidal beam oscillation can be observed in **Figure 3.3** (c), i.e., about 362 HV with parameters ( $P = 2200 \text{ W}$  and  $v = 50 \text{ mm/s}$ ) and about 341 HV with parameters ( $P = 1800 \text{ W}$  and  $v = 40 \text{ mm/s}$ ) and about 320 HV with parameters ( $P = 2000 \text{ W}$  and  $v = 30 \text{ mm/s}$ ). It can be seen that the maximum microhardness values of sinusoidal beam oscillation and square beam oscillation laser welding are higher as compared to those of triangular oscillation patterns.



(a)

(b)

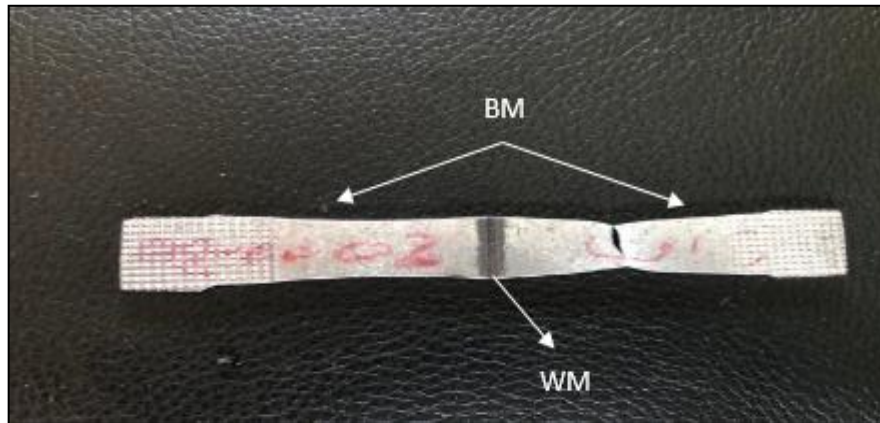


(c)

**Figure 3.3** The hardness distributions for all the welded samples with different parameters : (a) Square pattern (b) Triangular pattern and (c) Sinusoidal pattern for ASIS 304L

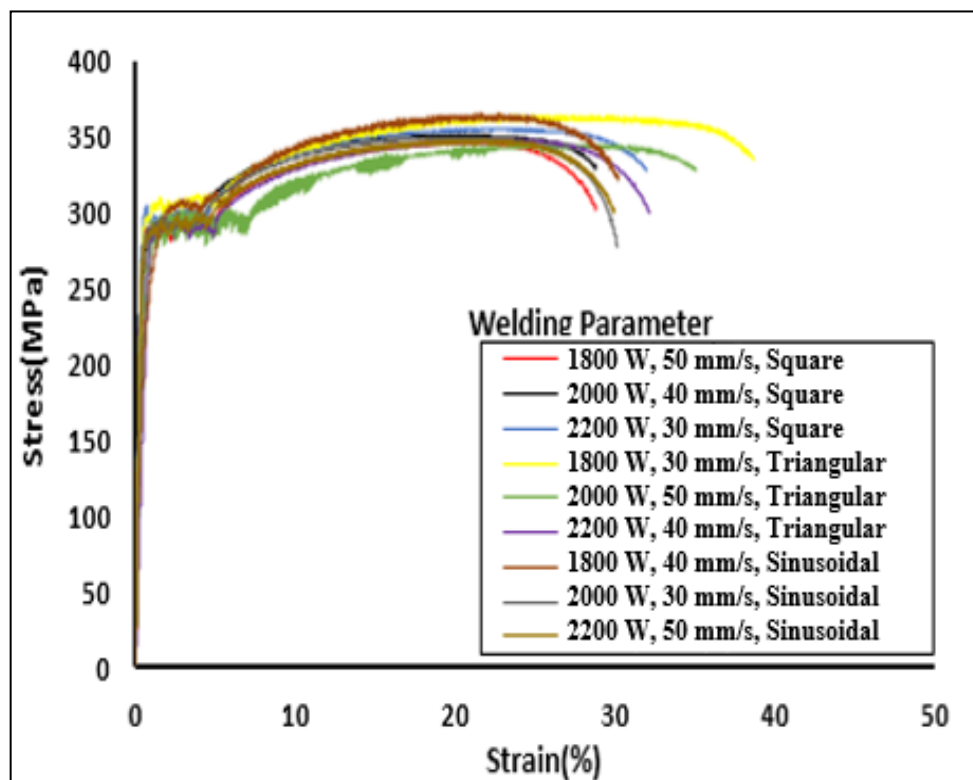
### 3.7.2 Tensile tests

Tensile strength results were obtained for all the welding conditions. **Figure 3.4** illustrates the test results, which show that all specimens separated from the melt zone and the heat-affected zone directly into the base metal.



**Figure 3.4** Top view of the fractured sample after the tensile test for ASIS 304L

**Figure 3.5** shows the stress-strain curves for all the welded specimens. The results were found to be in the range of 345.25 MPa to 366.26 MPa as shown in **Table 3.3**.



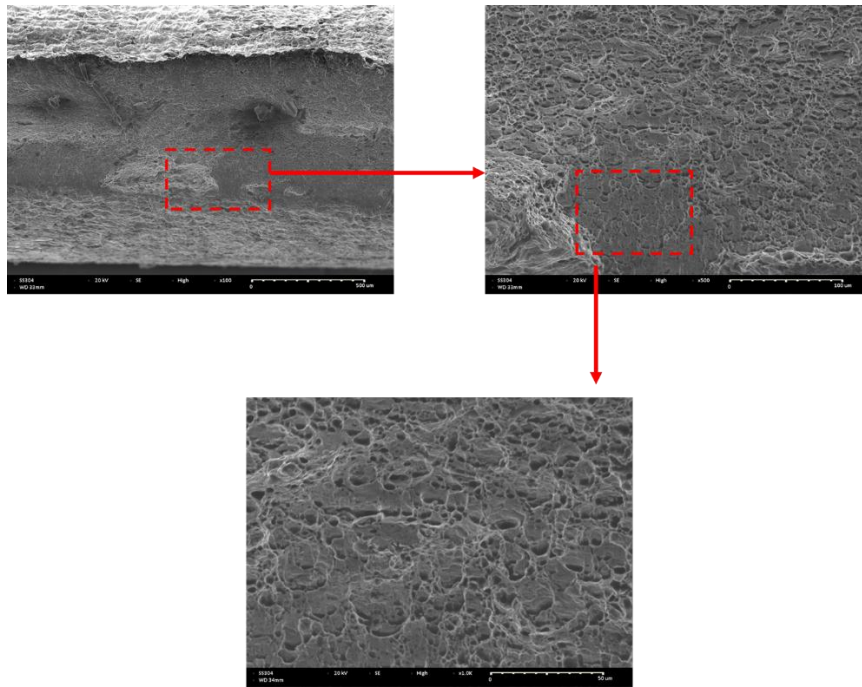
**Figure 3.5** Stress-strain curves for all the specimens for ASIS 304L

**Table 3.3** UTS values of the welded samples of ASIS 304L

S. No.	Laser Power (W)	Welding Speed (mm/s)	Pattern	UTS (MPa)
1	1800	50	Square	361.51
2	1800	40	Sinusoidal	364.50
3	1800	30	Triangular	366.26
4	2000	30	Sinusoidal	350.50
5	2000	50	Triangular	345.25
6	2000	40	Square	349.16
7	2200	40	Triangular	347.88
8	2200	30	Square	350.66
9	2200	50	Sinusoidal	349.24

The parametric combination of experimental cycle 5 in the welding scheme demonstrates a low tensile strength value of 345.25 MPa (see **Table 3.3**). Contrarily, the maximum tensile strength is calculated as 366.26 MPa via the parametric combination of experimental cycle 3 in the welding scheme. The UTS value is seen to rise from parametric combinations 5 to 3, even though the Oscillation Pattern factor stays the same. According to the results, the influence of the Oscillation Pattern factor on the tensile strength is negligible. However, the welding power and welding speed are two other variables that have a major impact on how the tensile strength value shifts.

Figure 6 shows the scanning electron microscopy (SEM) images of the fractured surface after tensile testing. All the weldments fractured in a "cup and cone" way; hence this figure is representative of all the weldments. Cup-and-cone fractures are caused by microvoid coalescence, and they are characteristic of ductile fracture mechanisms. However, **Figure 3.6** also shows some cleavage facets which indicate a brittle fracture in some regions of the weldments. Therefore, the overall fracture mode was dominantly ductile along with minor brittle fracture in certain areas of the weldments.



**Figure 3.6** SEM images of the fractured surface of a tensile sample for ASIS 304L

### 3.7.3 Statistical models and analysis

The appropriate response model for these response factors was selected based on the summaries of the experimental results.

#### 3.7.3.1 Analysis of variance (ANOVA)

ANOVA is used to determine the relative importance of each experimental parameter through statistical analysis. By comparing the square of the results to a calculated approximation of the experimental errors at predetermined levels of confidence, ANOVA formally tests the findings of all the principal factors and their relationships [20]. **Table 3.4** and **Table 3.5** show the results obtained by ANOVA for tensile strength. About 65.95 % of the calculated percentage is attributable to the welding power (W), followed by the welding speed (mm/s) at 4.32 % and the Oscillation Pattern at 0.81 %. The effects of the bidirectional interactions were also examined, and it was found that the interaction (P\*P) ranks first, contributing more than 28.03%. The interaction (P \* v) with a smaller contribution of 0.89% occupies the second rank. All the P values are lower than 0.05, so we know that the variables are all significant.

**Table 3.4** ANOVA result for the interaction model of ASIS 304L

<b>Variable</b>	<b>DDL</b>	<b>Square sum</b>	<b>Contribution (%)</b>	<b>Medium Square</b>	<b>F-Value</b>	<b>P-Value</b>
Model	6	499.305	99.99	83.217	3324.26	0.000
Laser power	1	329.3	65.95	156.802	6263.75	0.000
Welding speed	1	21.584	4.32	5.624	224.65	0.004
Oscillation Pattern	2	4.033	0.81	2.884	115.2	0.009
Two-factor interaction :						
P* P	1	139.946	28.03	139.946	5590.4	0.000
Two-factor interaction :						
P * v	1	4.44	0.89	4.44	177.37	0.006
Error	2	0.05	0.01	0.025		
Total	8	499.355	100			
S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)		
0.158219	99.99%	99.96%	0.947424	99.81%		

**Table 3.5** Coefficient of the bidirectional interaction model of ASIS 304L

<b>Term</b>	<b>Coefficient</b>	<b>P value</b>
Constant	1326.1	0.000
P	-0.9033	0.000
v	-1.680	0.004
M		
Square	0.890	0.014
Sinusoidal	0.3700	0.047
Triangular	-1.2600	0.004
P * P	0.000209	0.000
P * v	0.000745	0.006

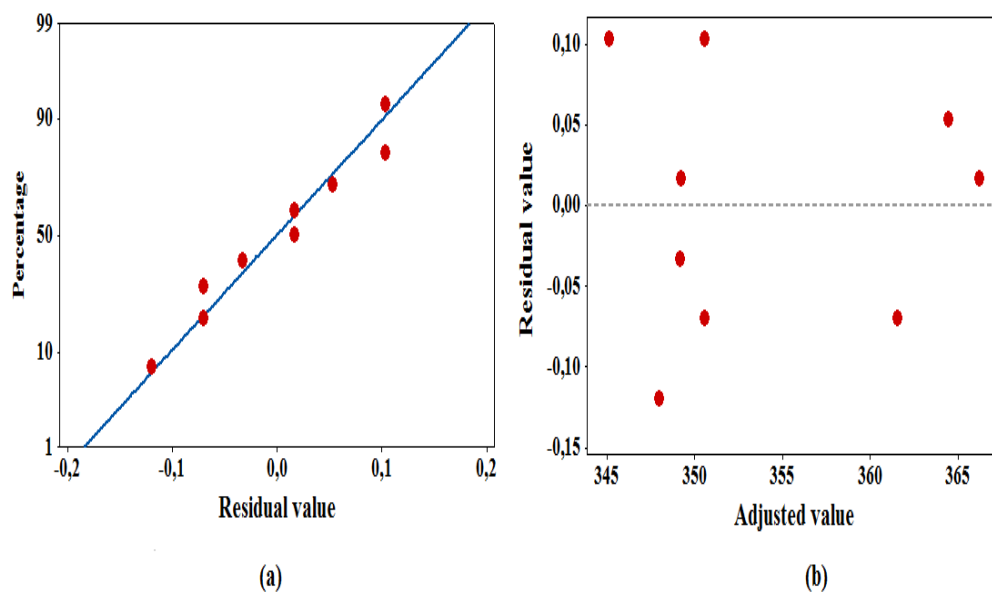
It is clear from **Table 3.4** and **Table 3.5** that the developed models are quite precise and can be used for further analysis. Following are the final mathematical models derived from the coded factors using Minitab:

Square Pattern  $UTS \text{ (MPa)} = 1327.0 - 0.9033 P - 1.680 v + 0.000209 PxP + 0.000745 Pxv$

Sinusoidal Pattern  $UTS \text{ (MPa)} = 1326.4 - 0.9033 P - 1.680 v + 0.000209 PxP + 0.000745 Pxv$

Triangular Pattern  $UTS \text{ (MPa)} = 1324.8 - 0.9033 P - 1.680 v + 0.000209 PxP + 0.000745 Pxv$

Validation of statistical models typically involves ensuring that the residuals are normally distributed. In a well-fitting model, the residuals (the gaps between the predicted and observed responses) should have a zero-mean normal distribution. For the most part, when conducting a regression analysis, the least squares approach is chosen. A perfect scenario would result in a straight line with no deviations [21,22]. A normal residue plot for weld fill passes, weld bead width, and bead integrity are shown in **Figure 3.7**. The majority of the points, with a few exceptions, lie on or very close to the straight line, demonstrating the accuracy of the models.



**Figure 3.7** Residuals plots for each model for ASIS 304L

### 3.7.3.2 Variation of the developed model

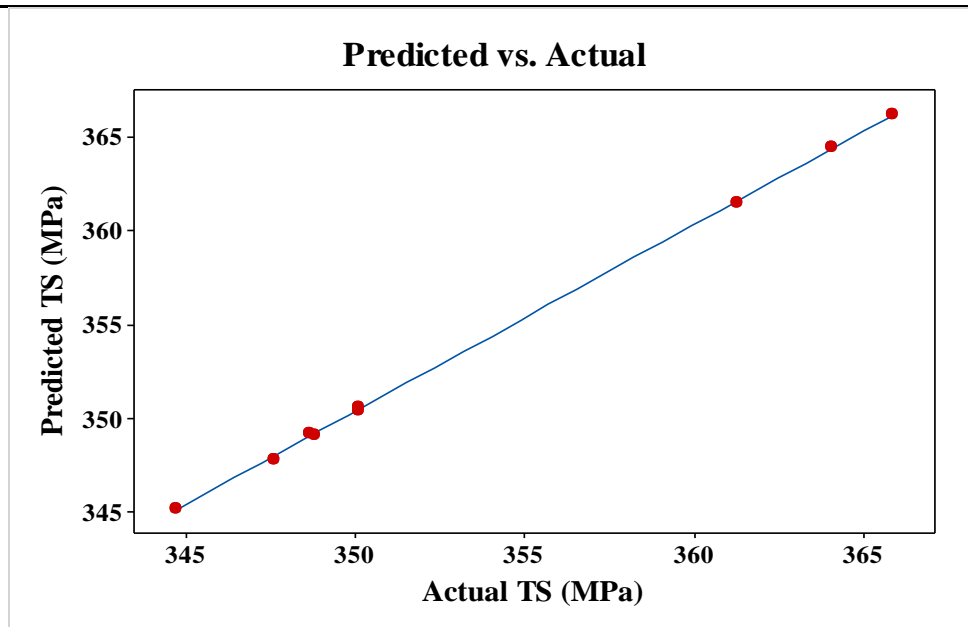
To ensure the developed models were sufficient, predicted values were calculated for all 9 experimental series and they were compared to the measured experimental values. Experiment setup, observed data, predicted values, and percentage of error are all



summarised in **Table 3.6**. The percentages of error in the prediction also agree well with the experimental results, demonstrating the developed models' high level of accuracy. In **Figure 3.8**, we see a scatter plot of the fitted values versus the measured values. As the figures show, the residuals in the prediction of each response are small and cluster around the diagonal, suggesting that the developed models are sufficient.

**Table 3.6** Confirmation experiments of ASIS 304L

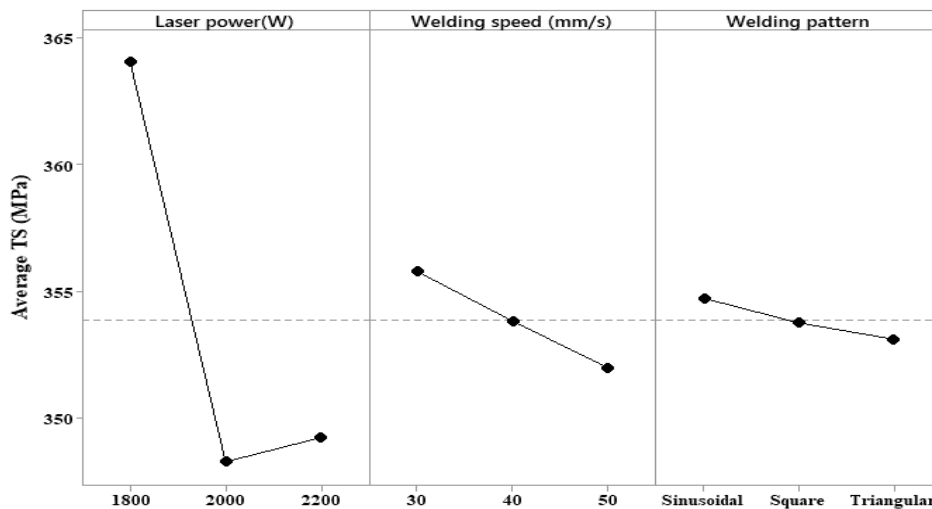
S. No.	Laser Power (W)	Welding Speed (mm/s)	Pattern Type	Ultimate Tensile strength value (MPa)		Error (%)
				Experimental	Model predicted	
1	1800	50	Square	361.51	361.27	0.07
2	1800	40	Sinusoidal	364.5	364.06	0.12
3	1800	30	Triangular	366.26	365.85	0.11
4	2000	30	Sinusoidal	350.5	350.1	0.11
5	2000	50	Triangular	345.25	344.7	0.16
6	2000	40	Square	349.16	348.8	0.1
7	2200	40	Triangular	347.88	347.6	0.12
8	2200	30	Square	350.66	350.07	0.17
9	2200	50	Sinusoidal	349.24	348.65	0.17



**Figure 3.8** Comparison of measured values with fitted values for the model for ASIS 304L

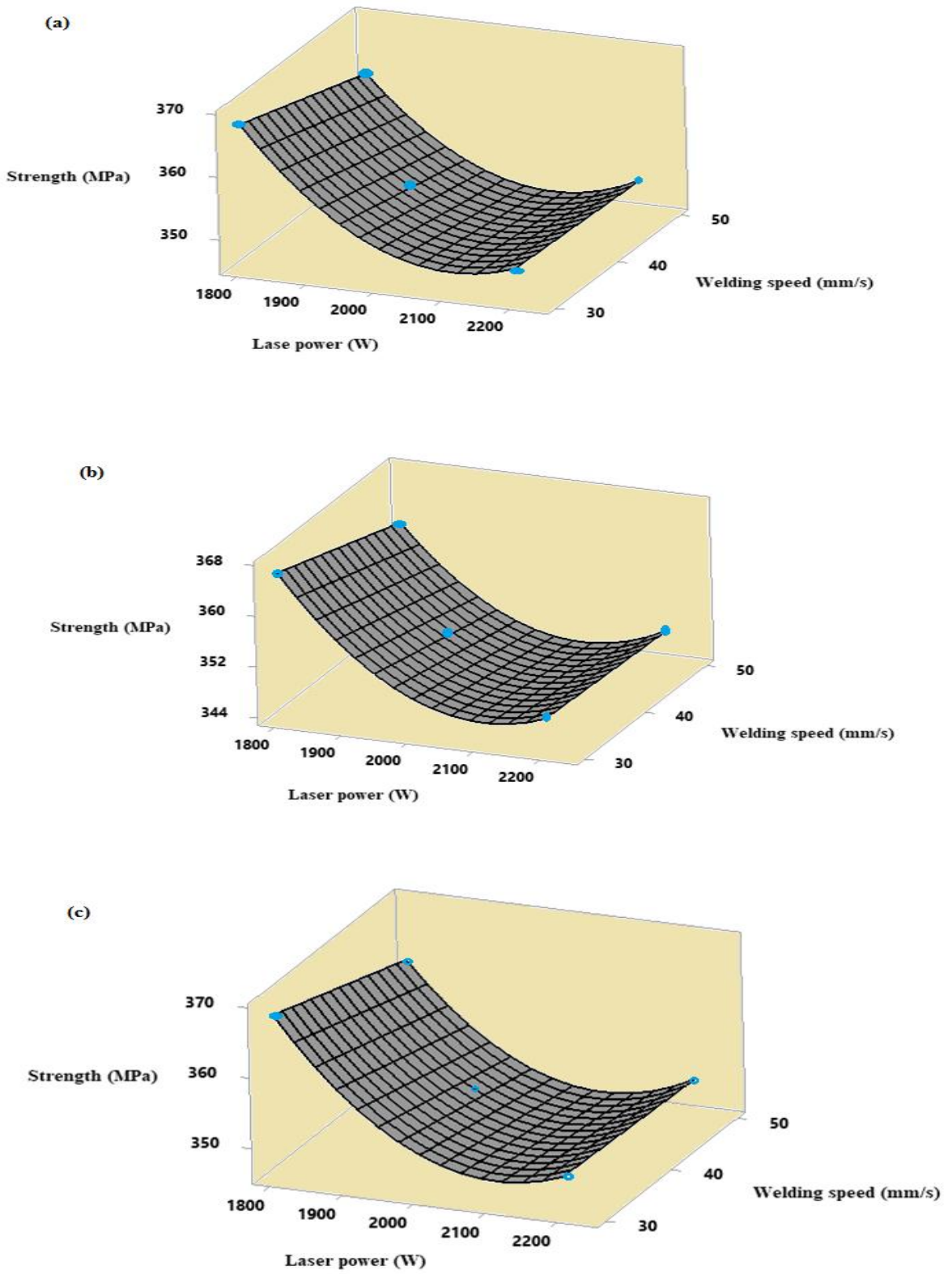
### 3.7.4 Effects of the process parameters on UTS response

The main process parameters effects on the UTS values of the welded specimens are plotted in **Figure 3.9**. Note that these plots illustrate the averages of the data as a function of the factor level. Based on these effects, each factor can be evaluated graphically. Laser power and welding speed were found to have the greatest impact on the mechanical properties of the welded specimens, while beam oscillation played a secondary role.



**Figure 3.9** Graph depicting the main effects on the UTS response for ASIS 304L

**Figure 3.10** depicts the combined influences of laser power and welding speed on tensile strength for the sinusoidal, triangular, and square oscillation patterns. At high rates of welding and with a strong laser, we find that the weld resistance is minimal. The strength of the joint was improved by reducing the laser power and welding speed, which led to more melting and mixing at the joint. According to **Figure 3.11**, the values of tensile strength which are of interest are the values above 360 MPa. These values are located in the blue and pink regions. The optimum response of tensile strength is obtained with a laser power of 1800 W and a welding speed in the range of 30 mm/s to 40 mm/s with a sinusoidal oscillation pattern as shown in **Figure 3.11**. It has a slightly higher tensile value than the other models. Therefore, we can conclude that the most suitable combination of welding parameters, could be with laser power of 1800 W, welding speed in the 30 mm/s to 40 mm/s range, and using the sinusoidal laser welding pattern.



**Figure 3.10** Surface diagrams of UTS (a) sinusoidal trajectory (b) triangular trajectory and (c) square trajectory for ASIS 304L

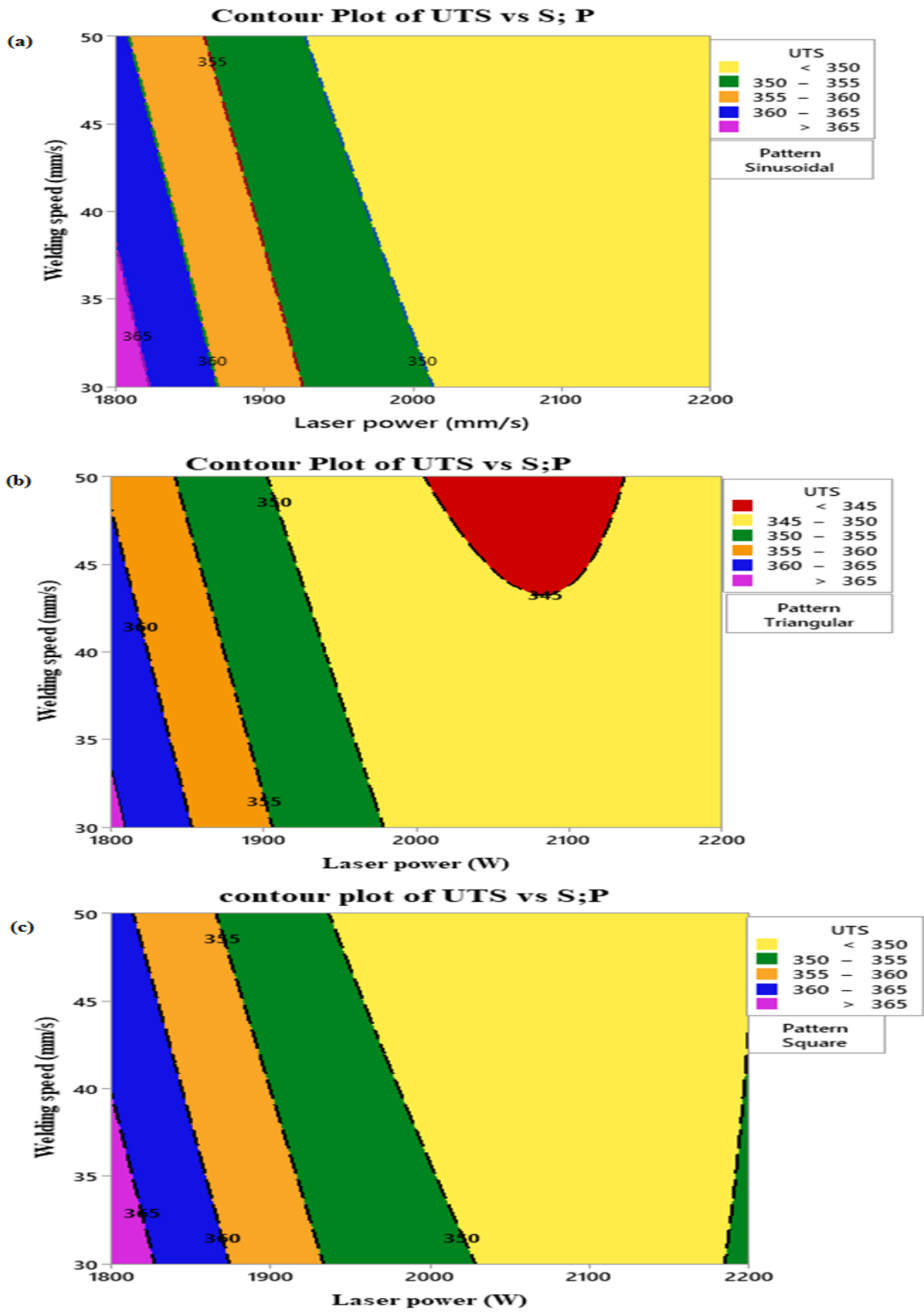
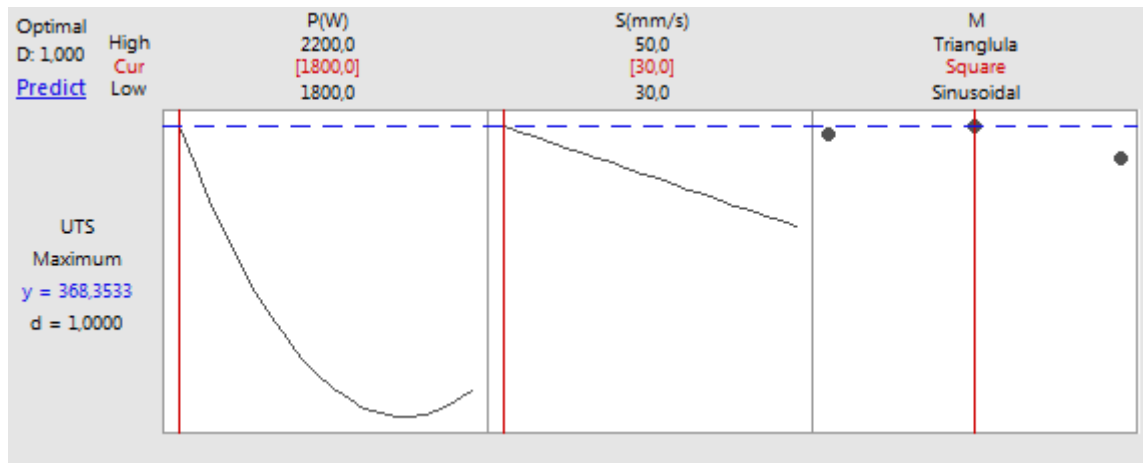


Figure 3.11 Contour plots of UTS during welding of the three oscillation patterns (sinusoidal, triangular, and square) for ASIS 304L

### 3.7.5 UTS optimization using desirability function analysis

One of the most common practices for improving product quality is analyzing preferences using a desirability function. In this optimization, we are trying to achieve a tensile strength (UTS) of 368.35 MPa, as this is the ideal value for a strong weld. The preferred outcome was achieved by setting the linear desirability function's lower bound, target, and upper bound to equal values. It was assumed that the linear desirability function ( $d$ ) had a value of 1. The optimization feature in Minitab v17 looks for a set of factor levels that meets the criteria for all answers and all factors at the same time. This method of optimization uses a mathematical model to explore the design space and identify the factors and their optimum settings. Standard optimization criteria have been used in this investigation. UTS at 368.35 MPa was chosen as the target in the criterion, with all other process parameters being held constant. The UTS optimization curves are displayed in **Figure 3.12**. Each row of this graph represents a response variable, and each column represents a process parameter. From the optimization graph (**Figure 3.12**), we can infer that the laser power of 1800 W, the welding speed of 30 mm/s, and the square pattern of laser welding are optimal for a response of 368.35 MPa.



**Figure 3.12** UTS response optimization diagram for ASIS 304L

### 3.8 CONCLUSION

The current study led to the following conclusions:

- The microhardness values of all samples peaked in the fusion zone and decreased towards the base metal, with the highest values obtained using the sinusoidal and square oscillation patterns.
- Laser power and welding speed were identified as the critical parameters affecting the mechanical properties of the welded joints, while beam oscillation only slightly affected the UTS values.
- The optimized welding parameters for the study were determined to be 1800 W laser power, welding speeds ranging from 30 mm/s to 40 mm/s, and using the sinusoidal oscillation pattern.
- To achieve a UTS value of 368.35 MPa, the best combination of parameters was identified as 1800 W laser power, 30 mm/s welding speed, and using a square oscillation pattern.

### 3.9 REFERENCES

- [1] K. Hu, W. Muneer, J. Zhang, et al., "Effect of beam oscillating frequency on the microstructure and mechanical properties of dissimilar laser welding of AA2060 and AA6061 alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 832, p. 142431, 2022.
- [2] T. Yan, J. Liu, K. Hu, et al., "Microstructure and texture evolution of Ti–6Al–4V alloy T-joint fabricated by dual laser beam bilateral synchronous welding," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 822, p. 141426, 2021.
- [3] W. Yang, J. Xin, C. Fang, et al., "Microstructure and mechanical properties of ultra-narrow gap laser weld joint of 100 mm-thick SUS304 steel plates," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 265, pp. 130-137, 2019.
- [4] K. Mao, H. Wang, Y. Wu, et al., "Microstructure-property relationship for AISI 304/308L stainless steel laser weldment," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 721, pp. 234-243, 2018.
- [5] L. Gardner, "Stability and design of stainless steel structures – Review and

- outlook," *Thin-Walled Struct.*, vol. 141, pp. 208-216, 2019.
- [6] I. Arrayago, E. Real, and L. Gardner, "Description of stress–strain curves for stainless steel alloys," *Mater. Des.*, vol. 87, pp. 540-552, 2015.
- [7] L. Gardner and X. Yun, "Description of stress-strain curves for cold-formed steels," *Constr. Build. Mater.*, vol. 189, pp. 527-538, 2018.
- [8] L. Gardner and D.A. Nethercot, "Experiments on stainless steel hollow sections—Part 1: Material and cross-sectional behaviour," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 60, pp. 1291-1318, 2004.
- [9] L. Gardner and D.A. Nethercot, "Experiments on stainless steel hollow sections—Part 2: Member behaviour of columns and beams," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 60, pp. 1319-1332, 2004.
- [10] B. Young and W.-M. Lui, "Behavior of Cold-Formed High Strength Stainless Steel Sections," *J. Struct. Eng.*, vol. 131, pp. 1738-1745, 2005.
- [11] L. Gardner and M. Theofanous, "Discrete and continuous treatment of local buckling in stainless steel elements," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 64, pp. 1207-1216, 2008.
- [12] L. De Baglion and J. Mendez, "Low cycle fatigue behavior of a type 304L austenitic stainless steel in air or in vacuum, at 20 °C or at 300 °C: Relative effect of strain rate and environment," *Procedia Eng.*, vol. 2, pp. 2171-2179, 2010..
- [13] C. H. Hung, W. T. Chen, M. H. Sehhat, et al., "The effect of laser welding modes on mechanical properties and microstructure of 304L stainless steel parts fabricated by laser-foil-printing additive manufacturing," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 112, pp. 867-877, 2021.
- [14] Z. Tian, Y. Peng, L. Zhao, et al., "Study of Weldability of High Nitrogen Stainless Steel," *Adv. Steels*, pp. 465-473, 2011.
- [15] L. Li, "The advances and characteristics of high-power diode laser materials processing," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 34, pp. 231-253, 2000.

- [16] A. Kurc-Lisiecka and A. Lisiecki, "Laser welding of the new grade of advanced high-strength steel Domex 960," *Mater. Tehnol.*, vol. 51, pp. 199-204, 2017.
- [17] A. Kurc-Lisiecka, "Impact toughness of laser-welded butt joints of the new steel grade strenx 1100MC," *Mater. Tehnol.*, vol. 51, pp. 643-649, 2017.
- [18] A. Kurc-Lisiecka and A. Lisiecki, "Weld metal toughness of autogenous laser-welded joints of high-strength steel DOMEX 960," *Mater. Perform. Charact.*, vol. 8, pp. MPC20190071, Aug. 2019, doi: 10.1520/MPC20190071.
- [19] S. Katayama, "Introduction: fundamentals of laser welding," in *undefined*, 2013, pp. 3-16.
- [20] N. H. M. Nor, N. Muhamad, M. H. I. Ibrahim, et al., "Optimization of injection molding parameter of ti-6al-4v powder mix with palm stearin and polyethylene for the highest green strength by using taguchi method," *EJUM*, 2011, accessed on Oct. 31, 2022. [Online].  
Available:<http://ejum.fsktm.um.edu.my/ArticleInformation.aspx?ArticleID=1048>
- [21] H. Shi, K. Zhang, Z. Xu, et al., "Applying statistical models optimize the process of multi-pass narrow-gap laser welding with filler wire," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 75, pp. 279-291, 2014.
- [22] M. M. A. Khan, L. Romoli, M. Fiaschi, et al., "Multiresponse optimization of laser welding of stainless steels in a constrained fillet joint configuration using RSM," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 62, pp. 587-603, 2012.



## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le but de ce mémoire est d'améliorer la technique de soudage laser de l'acier à travers une série d'études scientifiques et méthodiques. Le premier objectif est de déterminer les effets des paramètres de soudage au laser (puissance du laser et vitesse de soudage) sur l'acier doux ASTM A36 pendant le soudage par trois motifs de faisceau laser oscillant (sinusoïdal, triangulaire et carré). Le deuxième objectif est d'optimiser la résistance mécanique des soudures oscillées par faisceau laser d'un alliage d'acier galvanisé A653 en utilisant des données expérimentales et une méthode de surface de réponse. Le troisième objectif est de déterminer comment différentes conceptions d'oscillateurs affectent le soudage au laser de l'acier inoxydable 304L.

Les propriétés mécaniques des tôles d'acier soudées au laser de différentes qualités peuvent être réglées par les paramètres du processus de soudage, comme proposé dans ce travail (ASTM A36, ASTM A653 et AISI 304L). Dans ce cas, nous considérons la puissance du laser, la vitesse et le mode de soudage comme des variables indépendantes. Cette recherche améliore notre capacité à prédire les propriétés mécaniques (microdureté, résistance à la traction) et l'aspect de la microstructure en définissant des règles de contrôle pour les paramètres de soudage au laser (dimensions des joints de soudure). En raison de la complexité du développement, il faut envisager des installations expérimentales à l'échelle du laboratoire (cellules laser, équipement d'analyse des métaux et instruments d'essai des propriétés mécaniques) afin de vérifier l'exactitude des formules, des résultats et des modèles obtenus.

Tout au long de ce projet, on a vu que les paramètres de soudage, ainsi que les modes de soudage, peuvent changer radicalement la microstructure finale et les propriétés mécaniques des plaques d'acier. Les expériences ont été élaborées en utilisant la méthode Taguchi, ce qui a donné lieu à un plan factoriel partiel L9 basé sur le nombre de facteurs et le nombre de niveaux attribués à chacun.

La première étape de cette étude visait à optimiser les effets des paramètres de soudage au laser tels que la puissance du laser, la vitesse et le mode de soudage sur les propriétés mécaniques. Dans cette partie du mémoire, des plaques d'acier doux ASTM A36 de 1,8 mm d'épaisseur ont été soudées au laser. Les résultats des premières étapes ont indiqué :

- La microdureté de tous les échantillons atteint son maximum dans la région de la soudure et diminue progressivement de la région de la soudure vers le métal de base.
- Les valeurs maximales de microdureté des échantillons soudés par oscillation triangulaire sont supérieures à celles des échantillons soudés par oscillation sinusoïdale et carrée.
- La résistance à la traction durant le soudage par oscillation triangulaire du faisceau laser est plus élevée que pour les autres motifs d'oscillation, ce qui est attribué à la formation de structures de grains plus raffinées dans la région de la soudure.
- Les résultats ont également montré que la puissance du laser a un impact significatif sur la microdureté et la résistance à la traction, tandis que la vitesse de soudage a un effet plus limité.

La deuxième étape de cette étude visait à optimiser la résistance mécanique des soudures oscillées par faisceau laser d'un alliage d'acier galvanisé A653. Des données expérimentales ont été collectées en utilisant la méthode de surface de réponse pour analyser l'effet de la puissance du laser, de la vitesse de soudage et du motif d'oscillation sur la résistance à la traction des soudures. Les résultats ont montré que la puissance du laser a un effet significatif sur la résistance à la traction, suivie de la vitesse de soudage et du motif d'oscillation. La méthode de surface de réponse a permis d'optimiser les paramètres de soudage pour obtenir une résistance à la traction maximale.

La troisième étape de cette étude visait à étudier l'impact des différentes conceptions d'oscillateurs sur le soudage au laser de l'acier inoxydable 304L. Des expériences ont été menées pour comparer les effets de deux types d'oscillateurs différents (oscillateur magnétique et oscillateur piézoélectrique) sur les propriétés mécaniques des soudures en acier inoxydable 304L. Les résultats ont montré que les soudures réalisées avec

l'oscillateur magnétique avaient une microstructure plus fine et une résistance à la traction plus élevée que les soudures réalisées avec l'oscillateur piézoélectrique.

En conclusion, cette étude a montré que les propriétés mécaniques des soudures laser peuvent être ajustées en utilisant des paramètres de soudage appropriés. Les résultats ont également montré que l'oscillation du faisceau laser peut améliorer les propriétés mécaniques des soudures en acier. Les méthodes expérimentales utilisées dans cette étude peuvent être appliquées à d'autres alliages d'acier pour améliorer la qualité des soudures réalisées au laser.

## **RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS**

Cette section représente les perspectives qui peuvent être explorées sur la base des résultats de la recherche, ainsi que des propositions de recherches futures :

- Transposer la méthodologie sur d'autres alliages d'acier et de viser un domaine plus large pour l'utilisation de la technique
- Transposer la méthodologie sur des patrons de soudage différents pour tirer profit des avantages offerts par les autres formes d'oscillation autres que les oscillations sinusoïdale et carré puis triangulaire employées dans cette étude.
- Explorer les effets de cette étude sur d'autres propriétés mécaniques des matériaux telles que la résistance à la fatigue ou encore la résistance au cisaillement
- Explorez les autres effets du soudage au laser sur l'assemblage des alliages d'acier

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- D. Stangeland, "Modeling Of Steel Laser Cutting Process Using Finite Element, Machine Learning, And Kinetic Monte Carlo Methods," 2022.
- S. Sattarpanah Karganroudi, A. Aminzadeh, V. B. F. Kemda, and N. J. T. I. J. o. A. M. T. Barka, "3D hardness profile mapping and geometrical defect prediction of laser-welded galvanized steel blanks using wobbling technology: an experimental investigation," vol. 120, no. 3-4, pp. 2229-2246, 2022.
- F. Mirza, A. Macwan, S. Bhole, D. Chen, X.-G. J. M. S. Chen, and E. A, "Effect of welding energy on microstructure and strength of ultrasonic spot welded dissimilar joints of aluminum to steel sheets," vol. 668, pp. 73-85, 2016.
- I. Asibeluo and E. J. S. I. J. o. M. E. Emifoniye, "Effect of arc welding current on the mechanical properties of A36 carbon steel weld joints," vol. 2, no. 9, pp. 32-40, 2015.
- Rafieazad, Mehran, et al. "Microstructural evolution and mechanical properties of a low-carbon low-alloy steel produced by wire arc additive manufacturing." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 105 (2019): 2121-2134.
- B. Feujofack Kemda, N. Barka, M. Jahazi, and T. Osmani, "Optimization of resistance spot welding process applied to A36 mild steel and hot dipped galvanized steel based on hardness and nugget geometry," vol. 106, pp. 2477-2491, 2020.
- S. S. Karganroudi, A. Aminzadeh, V. B. F. Kemda, and N. Barka, "A Novel Method of Defect Detection Based on Experimental Investigation of Galvanized Steel Welded Plates Using Wobble Laser Process," 2021.
- J. Yang *et al.*, "Laser techniques for dissimilar joining of aluminum alloys to steels: A critical review," vol. 301, p. 117443, 2022.
- M. Arghavani, M. Movahedi, A. J. M. Kokabi, and Design, "Role of zinc layer in resistance spot welding of aluminium to steel," vol. 102, pp. 106-114, 2016.

N. Kumar, M. Mukherjee, A. J. O. Bandyopadhyay, and L. Technology, "Study on laser welding of austenitic stainless steel by varying incident angle of pulsed laser beam," vol. 94, pp. 296-309, 2017.

B. Fotovvati, S. F. Wayne, G. Lewis, E. J. A. i. M. S. Asadi, and Engineering, "A review on melt-pool characteristics in laser welding of metals," vol. 2018, 2018.

R. Rai, T. Palmer, J. Elmer, and T. J. W. J. Debroy, "Heat transfer and fluid flow during electron beam welding of 304L stainless steel alloy," vol. 88, no. 3, pp. 54-61, 2009.

N. Kumar, M. Mukherjee, A. J. O. Bandyopadhyay, and L. Technology, "Comparative study of pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 and AISI 316 stainless steels," vol. 88, pp. 24-39, 2017.

X. Zhan *et al.*, "Microstructure characteristics and mechanical properties of fiber-diode hybrid laser welded 304 austenitic stainless steel," vol. 854, p. 143884, 2022.